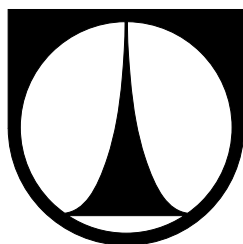


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



Simulace čidla DN40 elektromagnetického průtokoměru

Diplomová práce

Liberec 2013

Bc. Jakub Rosický

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Obor: 3906T001 – Mechatronika

**Simulace čidla DN40 elektromagnetického
průtokoměru**

**Simulation of the electromagnetic flow sensor
DN40**

Diplomová práce

Autor práce: **Bc. Jakub Rosický**
Vedoucí práce: Ing. Michal Kotek, Ph.D.
Konzultant práce: Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.

V Liberci 16. května 2013

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/ 2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Nejprve bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Michalovi Kotkovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Lubomíru Slavíkovi, Ph.D. za poskytnuté rady při řešení diplomové práce, Ing. Alešovi Svárovskému za výrobu budicích cívek a Ing. Miroslavu Novákovi, Ph.D. za pomoc při experimentálním měření průtokoměrného čidla.

Děkuji za spolupráci firmě BK Technic s.r.o. za poskytnutí programu SolidWorks a firmě LIMESA meters s.r.o. za propůjčení čidla DN40 elektromagnetického průtokoměru a dokumentace.

Nakonec děkuji rodině a blízkým za morální podporu a vytvoření výborného studijního prostředí.

Abstrakt

Cílem diplomové práce je vytvoření simulačního modelu čidla elektromagnetického průtokoměru DN40 v programech Ansys a Comsol Multiphysics a vypočtené hodnoty následně porovnat s experimentálním měřením v praxi.

Úvodní kapitoly jsou věnovány teoretickému rozboru. První kapitola se zabývá mechanikou tekutin, následně druhá kapitola je věnována elektromagnetickému poli, další vysvětluje princip elektromagnetického průtokoměru, čtvrtá kapitola popisuje matematické řešení elektromagnetického pole pomocí metody konečných prvků. Poslední kapitola řešební části je věnována popisu programů Ansys a Comsol Multiphysics.

V praktické části jsou nejprve popsány jednotlivé geometrie alternativních návrhů průtokoměrů, které byly vytvořeny pomocí CAD programu SolidWorks. Následně byly importovány do programů Ansys a Comsol multiphysics, ve kterých se vypočetly simulace magnetického pole a proudění kapalin. Podle dosažených výsledků byl zohledněn vliv mechanického provedení jednotlivých geometrií na výslednou citlivost průtokoměrů a byl vybrán model s nejlepšími výsledky.

Podle vybrané geometrie byl vyroben reálný model, který byl následně podroben zkoušce na průtokoměrné lince a naměřené hodnoty byly porovnány s hodnotami ze simulací programů Ansys a Comsol Multiphysics. V závěrečné diskuzi jsou zhodnoceny oba programy a korespondence výsledků simulací s praktickým provedením.

Klíčová slova

elektromagnetický průtokoměr, metoda konečných prvků, Ansys, Comsol Multiphysics

Abstract

The point of the thesis is to create a simulation model of an electromagnetic flow meter DN40 in programs Ansys and Comsol Multiphysics and to calculate values to compare with experimental measurement in practice.

The introductory chapters are focused on explanation of the theoretical part. The first chapter is dealing with mechanics of fluid, then the second chapter is focused on electromagnetic field, third chapter explains a principle of electromagnetic flow meter, the fourth chapter describes mathematical solution of electromagnetic field with finite element method. The last chapter of the research part is meant to describe programs Ansys and Comsol Multiphysics.

The practical part of the thesis describes every geometry of flow meter sensor, which were created using CAD program SolidWorks. Geometries were imported into the Ansys and Comsol Multiphysics software, which were used to solve simulations of magnetic field and fluid streams. Influences of mechanical design are explained by calculated design for every geometry on the final resulting sensitivity of the flow meter, then the best one was chosen according to the geometries.

The real flow meter was made using the best geometry, which was tested on the testing pipe. Measured values were compared with values from simulations of Ansys and Comsol Multiphysics. In the conclusion, both programs were evaluated and correspondence results of the simulations with practical product.

Key words

electromagnetic flow meter, finite element method, Ansys, Comsol Multiphysics

Obsah

Úvod	17
1 Mechanika tekutin	19
1.1 Definice pojmu tekutina	19
1.2 Definice ideální kapaliny	19
1.3 Definice neideální kapaliny	19
1.3.1 Laminární proudění	20
1.3.2 Turbulentní proudění	21
1.3.3 Reynoldsovo číslo	23
2 Elektromagnetické pole	24
2.1 Magnetická indukce	24
2.2 Lorentzova síla	25
2.3 Vektorový magnetický potenciál	25
2.4 Indukční čáry	27
2.5 Magnetický tok	28
2.6 Intenzita magnetického pole	28
2.7 Faradayův indukční zákon	29
2.8 Vlastní indukčnost	30
2.9 Vzájemná indukčnost	30
3 Průtokoměry	31
3.1 Elektromagnetický průtokoměr	31
3.1.1 Princip elektromagnetického průtokoměru	31
3.1.2 Vlastnosti elektrod	32
3.1.3 Vlastnosti magnetického pole	33
3.1.4 Vlivy působící na citlivost čidla	33
4 Matematické řešení elektromagnetického pole	35
4.1 FEM – metoda konečných prvků	36
4.1.1 Diskretizace oblasti	37

5	Programové prostředí pro výpočet FEM	38
5.1	Ansys	38
5.2	Comsol Multiphysics	39
6	Vytvoření geometrie modelu v CAD programu	41
6.1	Modifikace geometrií budicích cívek DN40	42
6.1.1	Geometrie budicích cívek s průměrem drátu 0,28 mm	42
6.1.2	Geometrie budicích cívek s průměrem drátu 0,315 mm	43
6.2	Modifikované geometrie svorníků budicích cívek	44
7	Simulace	46
7.1	Postup simulace v programu Ansys	47
7.2	Postup simulace v programu Comsol Multiphysics	48
7.3	Vliv mechanických úprav průtokoměru na magnetické pole	49
7.3.1	Vliv tvaru budicích cívek na magnetické pole	49
7.3.2	Shrnutí vlivu tvaru budicích cívek na magnetické pole	53
7.3.3	Vliv podélné šířky svorníků na magnetické pole	54
7.3.4	Shrnutí vlivu podélné šířky svorníků na magnetické pole	55
7.4	Vliv laminárního a turbulentního proudění na výsledné napětí mezi elektrodami	56
7.5	Shrnutí vlivu laminárního proudění	56
7.6	Shrnutí vlivu turbulentního proudění	58
8	Experimentální měření	61
8.1	Porovnání naměřených hodnot s hodnotami ze simulací	61
8.1.1	Porovnání původního průtokoměru se simulacemi	63
8.1.2	Porovnání funkčního modelu průtokoměru se simulacemi	64
8.1.3	Porovnání funkčního modelu s původním průtokoměrem	65
8.2	Měření na průtokoměrné lince	66
9	Shrnutí	69
9.1	Zhodnocení výsledků	69
9.2	Porovnání programů Ansys a Comsol Multiphysics	71

Závěr	73
Literatura	76
Přílohy	77

Seznam obrázků

1	Laminární proudění s rychlostním profilem a tečným napětím (převzato z [11])	20
2	Vliv Re a drsnosti na rychlostní profil – a) zobrazuje rychlostní profil v hladké trubici ovlivněný Reynoldsovým číslem, b) ukazuje při stálé hodnotě $Re = 10^6$ vliv drsnosti vnitřní stěny trubice.(převzato ze skript [11])	22
3	Rychlostní profily laminárního a turbulentního proudění	23
4	Zobrazení směru proudu u dvou vodičů	24
5	Indukční čáry tyčového magnetu	27
6	Cirkulace \mathbf{B} kolem vodiče s I_o	28
7	Princip elektromagnetického průtokoměru, U – napětí mezi elektrodami, B – směr magnetické indukce, D – průměr potrubí	32
8	Tvary elementů	37
9	Diskretizovaná oblast Ω	37
10	Program Ansys v prostředí workbench: 1. Výpis nadefinovaných systémů z Analysis systems, 2. Component systems pro složení vlastního systému, 3. Aktuální projekt se systémy Magnetostatic a Fluent	39
11	Zobrazený postup v COMSOL Multiphysics – 1. Geometry, 2. Physics, 3. Mesh, 4. Solution, 5. Result [13]	40
12	Původní průtokoměr DN40 – 1. vnitřní izolační trubka, 2. vnější trubka, 3. elektrody, 4. budicí cívky, 5. svorníky budicích cívek, 6. kryt průtokoměru	41
13	Budicí cívky s drátem $\varnothing 0,28$ mm a podélnou šířkou 56 mm: a) s průřezem vinutí 9×16 mm, b) s průřezem vinutí 11×13 mm	43
14	Budicí cívky s drátem $\varnothing 0,315$ mm a podélnou šířkou 76 mm: a) s průřezem vinutí 9×20 mm, b) s průřezem vinutí 11×17 mm, b) s průřezem vinutí 11×17 mm se zvětšeným úhlem výseče 86°	44
15	Svorníky budicích cívek s podélnou šířkou: a) 16 mm, b) 34 mm, c) 70 mm	45
16	Zobrazená spojnice mezi elektrodami	46
17	Zasítovaný model průtokoměru DN40 v Ansys Workbench	47
18	Zasítovaný model průtokoměru DN40 v Comsol Multiphysics	49
19	Graf závislosti magnetické indukce \mathbf{B} na spojnici z programu Ansys	50

20	Varianta s mezerou – budicí cívka o šířce 76 mm s rozměry $9 \times 20,8$ mm (Ansys)	51
21	Varianta bez mezery – budicí cívka o šířce 76 mm s rozměry 11×17 mm (Ansys)	51
22	Vektorové rozložení magnetické indukce \mathbf{B} u výchozí geometrie cívky (Cmsol Multiphysics)	52
23	Vektorové rozložení magnetické indukce \mathbf{B} u geometrie cívky s podélnou šířkou 76 mm, s rozměry průřezu vinutí 11×17 mm a s úhlem výseče 86° (Cmsol Multiphysics)	52
24	Graf závislosti magnetické indukce \mathbf{B} na spojnici s variantami svorníků z programu Cmsol Multiphysics	54
25	Zobrazení magnetické indukce \mathbf{B} [T] u budicí cívky s 11×17 mm, šířkou 76 mm a úhlem výseče 86° se svorníkem o šířce 34 mm a potlačeným krytem (Cmsol Multiphysics)	55
26	Kompletní zapojení průtokoměru pro program Cmsol Multiphysics	56
27	Laminární profil proudění na spojnici mezi elektrodami	57
28	Turbulentní profil proudění na spojnici mezi elektrodami při $v = 0,86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	59
29	Turbulentní profil proudění na spojnici mezi elektrodami při $v = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	59
30	Rozložení napětí U mezi elektrodami při rychlosti $v = 0,86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ z programu Cmsol Multiphysics	60
31	Vyrobený funkční model elektromagnetického průtokoměru	61
32	Pracovní stůl s polohovacím zařízením: 1) Hirst Gaussmeter GM08, 2) pracovní notebook, 3) polohovací zařízení, 4) 1D Hallova sonda, 5) měřený průtokoměr, 6) multimetr Agilent U1252A, 7) stejnosměrný zdroj Agilent E3631A	62
33	Rozložení měřicích bodů v rovině elektrod průtokoměru DN40	63
34	Graf závislosti magnetické indukce \mathbf{B} na spojnici mezi elektrodami při porovnání simulací s původním průtokoměrem	63
35	Graf závislosti magnetické indukce \mathbf{B} na spojnici mezi elektrodami při porovnání simulací s FM průtokoměrem	64
36	Graf závislosti magnetické indukce \mathbf{B} na spojnici mezi elektrodami při porovnání původního průtokoměru s FM průtokoměru s ocelovými svorníky a se svorníky z transformátorového plechu	65

37	Zobrazení rozložení magnetické indukce \mathbf{B} v rovině elektrod u FM s transformátorovými plechy	66
38	Průtokoměrná linka v místnosti TK8: 1) funkční model průtokoměru, 2) původní průtokoměr	67
39	Graf porovnání citlivosti průtokoměrů	68

Seznam tabulek

1	Výsledné hodnoty modifikovaných budících cívek ($N = 1100$ a $I_B = 200\text{ mA}$)	50
2	Výsledné hodnoty modifikovaných svorníků ($N = 1100$ a $I_B = 200\text{ mA}$) . . .	54
3	Výsledná napětí U při laminárním proudění	57
4	Výsledná napětí U při turbulentním proudění	58
5	Naměřené hodnoty na průtokoměrné lince	67

Seznam použitých symbolů

Symbol	Veličina	Jednotka
\mathbf{A}	vektorový potenciál	$\text{Wb}\cdot\text{m}^{-1}$
\mathbf{B}	magnetická indukce	T
c	rychlost proudění tekutin	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
χ_m	magnetická susceptibilita	–
D	průměr potrubí	mm
DN	Diameter Nominal – jmenovitý průměr	mm
\mathbf{E}	intenzita elektrického pole	$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$
\mathbf{F}_e	elektrická síla	N
\mathbf{F}_{mg}	magnetická síla	N
Φ	magnetický tok	Wb
\mathbf{H}	intenzita magnetického pole	$\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$
I	elektrický proud	A
\mathbf{J}	proudová hustota	$\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$
L	vlastní indukčnost	H
λ	třecí ztráty	–
\mathbf{M}	vektor magnetizace	$\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$
M	vzájemná indukčnost	H
$\mu = \mu_0\mu_r$	permeabilita prostředí	$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$
μ_0	permeabilita vakua	$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$
μ_r	relativní permeabilita	–
ν	kinematická viskozita	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
q	náboj	C
p	tlak	Pa
Re	Reynoldsovo číslo	–
ρ	hustota	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ρ_M	měrný odpor	$\Omega\text{mm}^2\cdot\text{m}^{-1}$

τ	tečné napětí	Pa
σ	vodivost	$\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$
U	napětí	V
v	rychlost	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Seznam použitých zkratk a názvů

Ansys	programové prostředí
Comsol Multiphysics	programové prostředí
CAD	Computer Aided Desing
FEM	Finite Element Method – Metoda konečných prvků
FM	funkční model
Matlab	výpočetní program
PTFE	teflon
SolidWorks	CAD program
TUL	Technická univerzita v Liberci

Úvod

V technické praxi pro měření průtoku kapalin se využívají různé typy a varianty průtokoměrů. Průtokoměry se dělí na dvě hlavní skupiny. První skupinou jsou průtokoměry, které se označují jako objemové. Ve druhé skupině jsou hmotnostní průtokoměry. Do první skupiny patří průtokoměry: lopatkové, vírové, plováčkové, clonové, ultrazvukové a indukční. Hmotnostní průtokoměry jsou založené na Coriolisových silách nebo na kalorimetrii. Tato diplomová práce se zabývá studií elektromagnetických průtokoměrů, které se zahrnují do skupiny indukčních průtokoměrů.

Pro vysvětlení principu elektromagnetických průtokoměrů se využívá Faradayův indukční zákon, kde na proudící kapalinu působí časově proměnné magnetické pole a v rovině kolmé na směr magnetické indukce vzniká elektrické napětí. Mezi hlavní přednosti indukčních průtokoměrů patří: ve vnitřním průřezu nejsou mechanické části, a proto nedochází k tlakové ztrátě v potrubí; průtokoměry lze využívat pro měření agresivních a korozivních médií; spolehlivá činnost a vysoká mechanická odolnost; průtokoměr lze instalovat vertikálně, horizontálně i diagonálně; nízké náklady na obsluhu a údržbu; lze je využít i pro obousměrné měření.

Mezi jistá omezení elektromagnetických průtokoměrů lze zahrnout: malé indukované napětí mezi elektrodami; možnost znečištění nebo poškození elektrod, které způsobuje jejich netěsnost; nevhodnost pro měření plynů a par; přítomnost plynu v měřené kapalině je příčinou nepřesného měření; pro správné fungování průtokoměru je podmínkou minimální elektrická vodivost kapaliny $5 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. V literatuře [1] se uvádí pro demineralizovanou vodu elektrická vodivost $0,01 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, pro pitnou vodu je elektrická vodivost v rozmezí 200 až $800 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ a v intervalu 1×10^5 až $8\times 10^5 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ se nachází kyseliny.

Samotný elektromagnetický průtokoměr se skládá z vnitřní izolační trubky, vnější trubky, elektrod, budicích cívek, svorníků a z vnějšího krytu, který je spolu se svorníky vyroben z feromagnetického materiálu. Pomocí budicích cívek je vytvořeno magnetické pole, které má vliv na výslednou citlivost elektromagnetického průtokoměru. Samotné magnetické pole je nejvíce ovlivňováno konstrukčním provedením budicích cívek. Mezi další faktory působící na magnetické pole jsou svorníky cívek a vnější kryt.

Cílem diplomové práce bylo zlepšení citlivosti čidla elektromagnetického průtokoměru.

Jako výchozí vzor čidla elektromagnetického průtokoměru byly použity čidla DN40 firmy LIMESA meters s.r.o. Pro simulace magnetického pole a proudění byly zvoleny programy Ansys a Comsol Multiphysics. Nejprve byly provedeny simulace magnetického pole. Prvním krokem bylo porovnání původní budicí cívky s jejími modifikacemi. Po vybrání nejvhodnější varianty budicí cívky následovala optimalizace svorníku na budicí cívky. Porovnávané varianty svorníků musely být upraveny pro nový tvar budicí cívky. Nejvhodnější varianta svorníku byla vybrána podle působení na magnetické pole a podle konstrukčního uspořádání v průtokoměru. Dalším krokem bylo vyrobení budicí cívky a svorníků podle vybraných variant. Vyrobený funkční model průtokoměru byl proměřen pomocí Hallovy sondy pro ověření hodnot ze simulací. Posledním krokem bylo porovnání funkčního modelu průtokoměru s původním průtokoměrem na průtokoměrné lince.

1 Mechanika tekutin

V práci jsou uvedeny vybrané partie z fyziky, které jsou potřebné k následnému vysvětlení a pochopení principu elektromagnetického průtokoměru. Mezi tyto partie patří mechanika tekutin a elektromagnetické pole.

1.1 Definice pojmu tekutina

Nejprve začneme definicí tekutiny. Mezi tekutiny patří látky kapalné a plynné. V učebnici [5] ještě dodávají, že lze do této skupiny popřípadě zařadit i plazmu¹. Molekuly tekutin se vzájemně pohybují, a tím se projevuje jejich základní vlastnost – tekutost. Dalším projevem charakterizujícím tekutiny je přizpůsobení se tvaru nádoby, ve kterých jsou uchovány.

Ve fyzice pro mechaniku tekutin jsou zavedeny termíny ideální a reálná kapalina (tekutina) neboli neideální. Jejich rozdíly jsou ve vlastnostech a v chování tekutiny.

1.2 Definice ideální kapaliny

Během řešení složitých úloh můžeme narazit na vysokou náročnost matematického a fyzikálního řešení. Z tohoto důvodu se využívá ideální kapalina místo reálné, a tím dosáhneme zjednodušení úlohy pro následné řešení.

Mezi charakterizující vlastnosti ideální kapaliny patří neviskóznost, nestlačitelnost, ustálenost, laminární a nevírové proudění. Pro její popis se využívá rovnice kontinuity a Bernoulliho rovnice.[5]

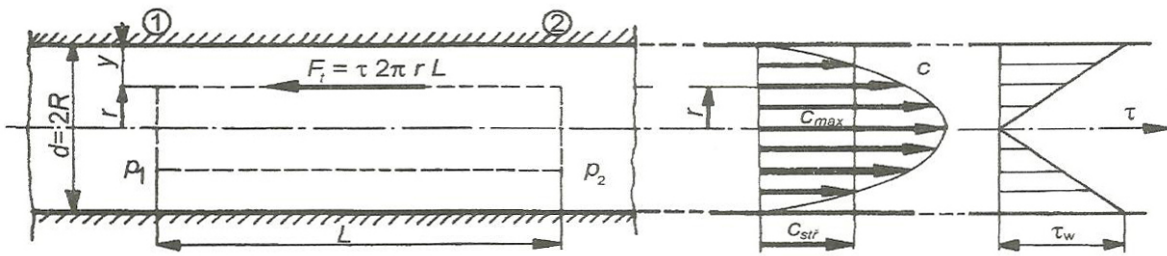
1.3 Definice neideální kapaliny

Neideální kapalina (tekutina) se snaží nahrazovat reálnou tekutinu ve fyzikálních úlohách. Největší rozdíl neideální kapaliny od ideální spočívá ve vzniku viskozity (tření) při proudění kapaliny. Tření nalezneme mezi stěnou trubice a kapalinou, ale také mezi jednotlivými vrstvami kapaliny, které mají různou rychlost. Za tohoto předpokladu kromě tření vzniká i teplo, které ovlivňuje Bernoulliho rovnici, ale na rovnici kontinuity nemá vliv. [8]

¹Plazmu můžeme charakterizovat jako ionizovaný plyn, který obsahuje neutrální atomy, ionty a elektrony. Vzniká při vysokých teplotách a při proudění hypersonickými rychlostmi. Mezi další vlastnosti patří elektrická vodivost.[11]

1.3.1 Laminární proudění

Pro vysvětlení laminárního proudění vycházíme ze skript [11], ve kterých se pro odvozování matematických vztahů využívá nestlačitelná vazká newtonská tekutina při stacionárním laminárním proudění. Pro tekutinu je charakteristické, že se vyznačuje konstantní hustotou ρ a konstantní dynamickou viskozitou η , která proudí ve vodorovné trubici o stálém průměru $D = 2R$ (obr. 1). Pro zachování stejného značení veličin podle skript se v této kapitole rychlost označuje symbolem c a střední rychlost symbolem $c_{stř}$.



Obrázek 1: Laminární proudění s rychlostním profilem a tečným napětím (převzato z [11])

Z kapitoly o viskozitě z [8] vyplývá, že vazká tekutina vytváří symetrický rychlostní profil, který má maximální rychlost v ose trubice a nulovou rychlost na stěně trubice. Pro výpočet tečného napětí τ se využívá následující vzorec.

$$\tau = -\eta \frac{dc}{dr} \quad (1.1)$$

Na obr. 1 vidíme body 1 a 2, které jsou od sebe ve vzdálenosti L . Mezi těmito body dochází ke ztrátě tlaku způsobené třením. Za předpokladu stálosti proudění můžeme tvrdit, že tlaková ztráta připadající na vzdálenost L bude v trubici konstantní. Tlakovou ztrátu způsobenou třením vyjádříme vzorcem

$$\Delta p_{zt} = p_1 - p_2. \quad (1.2)$$

Pokud vezmeme body 1 a 2 jako průřezy, tak mezi nimi můžeme sestrojit válec o poloměru r , jenž bude mít na plášti lokální rychlost c . Pro válec bude platit, že na plášť bude působit třecí síla a na podstavy tlaková síla, jelikož je v trubici rovnoměrný pohyb. Proto lze pro válec napsat podmínku rovnováhy

$$p_1 \pi r^2 - p_2 \pi r^2 - \tau 2 \pi r L = 0. \quad (1.3)$$

Pokud do vzorce (1.3) dosadíme za τ vztah (1.1) a provedeme další matematické úpravy, u kterých se využije rovnice (1.2), pak bude výsledná rovnice vypadat následovně

$$(p_1 - p_2)r \, dr = -2\eta L \, dc \quad \Rightarrow \quad \int_0^c dc = \frac{\Delta p_{zt}}{2\eta L} \int_r^R r \, dr. \quad (1.4)$$

Provedením výpočtu určitého integrálu ve vztahu (1.4), je výsledkem rovnice pro rychlostní profil

$$c = \frac{\Delta p_{zt}}{4\eta L} (R^2 - r^2) = \frac{\Delta p_{zt}}{16\eta L} (D^2 - d^2). \quad (1.5)$$

Pro výpočet maximální rychlosti využijeme vzorec (1.5), do kterého dosadíme hodnotu $d = 0$

$$c_{max} = \frac{\Delta p_{zt}}{16\eta L} D^2. \quad (1.6)$$

Střední hodnotu vypočteme podle následujícího vztahu

$$c_{max} = \frac{c_{max}}{2} = \frac{\Delta p_{zt}}{32\eta L} D^2. \quad (1.7)$$

Pro výpočet třecích ztrát, které vznikají třením mezi kapalinou a stěnou trubice, se používá následující vzorec, jenž obsahuje symbol Re označující Reynoldsovo číslo, které je vysvětleno v kapitole 1.3.3.[14]

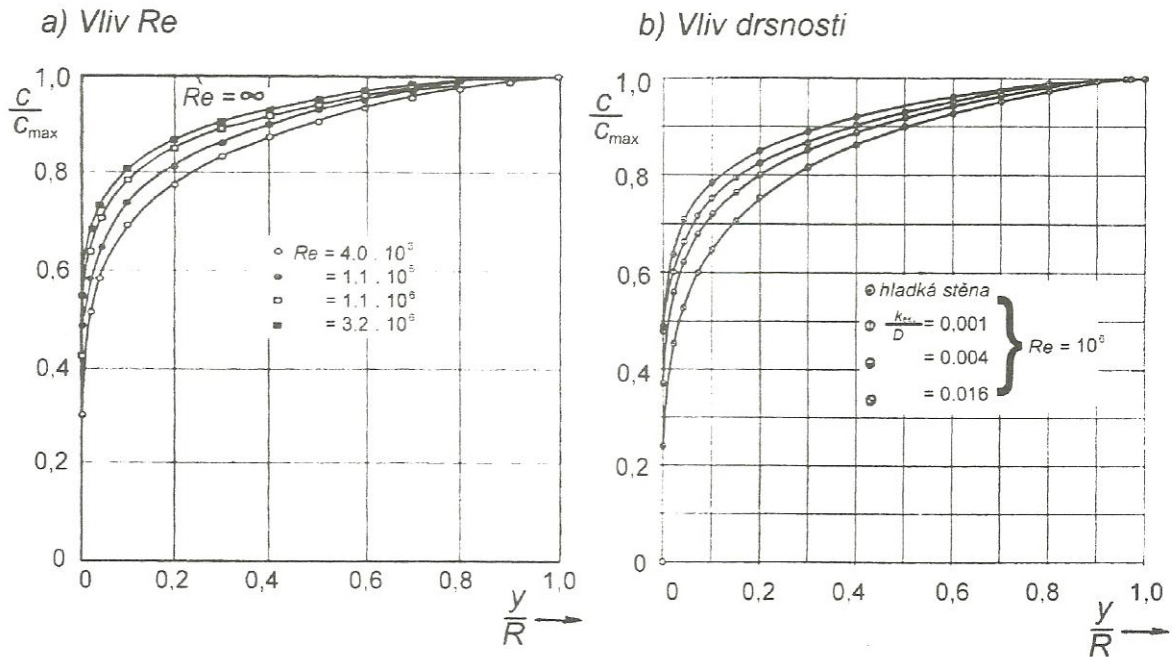
$$\lambda_{lam} = \frac{64}{Re} \quad (1.8)$$

1.3.2 Turbulentní proudění

I v této kapitole budeme používat pro rychlost symbol c kvůli dodržení značení veličin podle skript [11]. Mezi faktory ovlivňující turbulentní proudění patří Reynoldsovo číslo (Re), dále také drsnost na vnitřní straně trubice. Pro přesnější představu vlivu faktorů na rychlostní profil získal Nikuradse roku 1932 empirické hodnoty a zahrnul je do grafu, který je zobrazen na obr. 2.

Pro výpočet rychlostních profilů se používají empirické mocninné zákony, ve kterých se nachází symbol y označující vzdálenost od stěny a celý mocnitel se označuje symbolem n . Pokud při turbulentním proudění platí podmínka $Re \leq 10^5$, tak se pokládá nejčastěji $n = 7$. Další hodnoty n jsou vysvětleny ve skriptech [11]. Pro výpočet maximální rychlosti c_{max} a lokální rychlosti c se užívá vzorec

$$\frac{c}{c_{max}} = \left(\frac{y}{R} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (1.9)$$



Obrázek 2: Vliv Re a drsnosti na rychlostní profil – a) zobrazuje rychlostní profil v hladké trubici ovlivněný Reynoldsovým číslem, b) ukazuje při stálé hodnotě $Re = 10^6$ vliv drsnosti vnitřní stěny trubice. (převzato ze skript [11])

Pro určení střední rychlosti $c_{stř}$ použijeme následující vztah

$$c_{stř} \cong \frac{c_{max}}{1,24}. \quad (1.10)$$

Pro výpočet rychlostního profilu existuje další metoda, která je založena na modelech turbulence. Je sestavena podle směšovací délky Prandtlova modelu a je označována jako logaritmický rychlostní profil. Nejprve si nadefinujeme tečné napětí na stěně τ_w [Pa], které se určí podle vazké podvrstvy a symbol y označuje vzdálenost od vrstvy.

$$\tau_w = 0,16\rho y^2 \left(\frac{dc}{dy} \right)^2 \quad (1.11)$$

Pro lokální rychlost c platí následující vztah

$$c = 2,5 \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \ln y + konst. \quad (1.12)$$

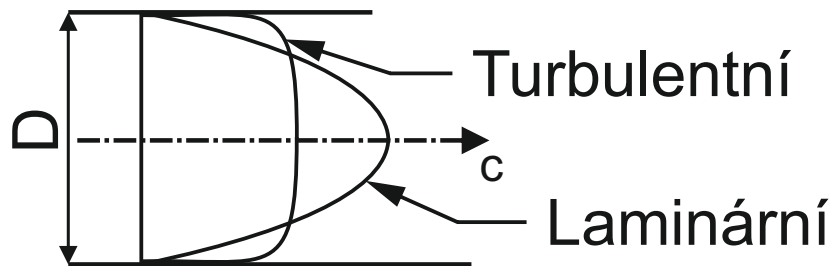
Turbulentní třecí ztráty jsou definovány pro proudění v hladkém a drsném potrubí. Pro proudění v hydraulicky hladkém potrubí využíváme vztahu (1.13). [14]

$$\lambda_{tur-hl} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \quad (1.13)$$

Pokud proudění probíhá v hydraulicky drsném prostředí, musíme využívat složitější vzorec, který obsahuje zlomek $\frac{r}{k}$ označující poměrnou hladkost, veličina k je střední výška nerovností.[14]

$$\lambda_{tur-dr} = \frac{1}{\left(2 \lg \frac{r}{k} + 1,74\right)^2} \quad (1.14)$$

Pro porovnání tvaru rychlostního profilu u laminárního a turbuletního proudění použijeme obr. 3, který je překreslen ze skript [3]. Rychlost je zde značena symbolem c .



Obrázek 3: Rychlostní profily laminárního a turbuletního proudění

1.3.3 Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo je bezrozměrná jednotka, podle které můžeme určit typ proudění v potrubí.

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (1.15)$$

Symbol D [m] ve vzorci (1.15) se označuje jako charakteristická dimenze proudění (průměr potrubí atd.), ν je kinematická viskozita.[11]

V literatuře [2] je uvedeno kritické Reynoldsovo číslo, které má hodnotu $Re_{krit} = 2320$. Pokud je Re menší než kritická hodnota, tak se jedná o laminární proudění. Ve druhém případě pokud je Re větší než kritická hodnota, tak je proudění turbulentní. Avšak v okolí kritické hodnoty není možné přesně určit typ proudění.

2 Elektromagnetické pole

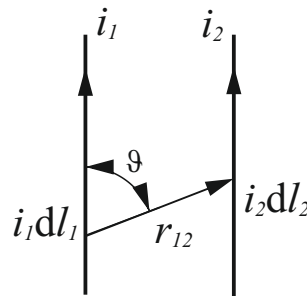
Pro elektromagnetické pole platí, že se s ním můžeme setkat jak v technické praxi, tak i ve volné přírodě.

V technické praxi se používají permanentní magnety a elektromagnety. Výhodou permanentních magnetů je jich schopnost vytvářet magnetické pole bez nutnosti elektrického proudu. Naproti tomu elektromagnetické magnety potřebují pro vytvoření magnetického pole elektrický proud. Elektromagnet je tvořen pomocí měděného drátu, který je stočen do cívky. Pokud prochází elektrický proud cívkou, tak vzniká magnetické pole okolo cívky.

2.1 Magnetická indukce

Pro popis magnetického pole se užívá veličina magnetická indukce \mathbf{B} . Jedná se o vektorovou veličinu, která se udává v jednotkách tesla [T], nebo jako weber na metr čtvereční [$\text{Wb} \cdot \text{m}^{-2}$].

Na obr. 4 jsou zobrazeny dva vodiče, kterými prochází proud. Pro určení působící síly mezi vodiči byly provedeny experimentální pokusy.



Obrázek 4: Zobrazení směru proudu u dvou vodičů

Výsledná síla byla stanovena pro dva paralelní elementy proudovodičů. Symbol μ_0 označuje permeabilitu vakua.

$$dF = \frac{\mu_0}{4\pi r_{12}} i_1 dl_1 i_2 dl_2 \sin \vartheta \quad (2.1)$$

Nejprve upravíme (2.5) na působení síly na elementární úsek vodiče dl s proudem I .

$$dF_{mg} = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B}, \quad (2.2)$$

Následně se k proudovému elementu $i_1 d\mathbf{l}_1$ přiřadí vektorová veličina $d\mathbf{B}$ vektorového pole. U přiřazeného pole musí být vztahy (2.1) a (2.2) ve shodě. Výsledný vztah je Biot-Savartův zákon. [7], [12]

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i d\mathbf{l} \times \mathbf{r}_0}{r^2} \quad (2.3)$$

2.2 Lorentzova síla

Nechť máme elektromagnetické pole, ve kterém se pohybuje konstantní rychlostí \mathbf{v} elektricky nabitá částice q . Na její trajektorii pohybu mají vliv dvě složky síly. První složkou je elektrická síla \mathbf{F}_e , která popisuje silové působení mezi částicemi v klidu, kde \mathbf{E} je intenzita elektrického pole. Z toho plyne následující vztah

$$\mathbf{F}_e = q\mathbf{E}. \quad (2.4)$$

Druhou složkou je magnetická síla \mathbf{F}_{mg} , která ovlivňuje pouze náboje v pohybu. Experimentálně bylo zjištěno, že magnetická síla \mathbf{F}_{mg} má směr vždy kolmý na směr rychlosti \mathbf{v} ($\mathbf{F}_{mg} \perp \mathbf{v}$). Další vlastnost popisuje výslednou velikost magnetické síly \mathbf{F}_{mg} podle vzorce (2.5), která je závislá na směru rychlosti \mathbf{v} . Pokud je směr rychlosti $\mathbf{v} \parallel \mathbf{B}$, potom výsledná síla \mathbf{F}_{mg} je nulová. Naopak za předpokladu, že rychlost \mathbf{v} je kolmá na magnetickou indukci \mathbf{B} ($\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$), potom tedy dosahuje magnetická síla \mathbf{F}_{mg} maximální možné hodnoty.

$$\mathbf{F}_{mg} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.5)$$

Na náboj tedy působí celková elektromagnetická síla, která se nazývá Lorentzova síla a je uvedena následujícím vzorcem

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_{mg} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (2.6)$$

Pro Lorentzovu sílu platí, že byla experimentálně dokázána a nelze ji odvodit z ostatních postulátů. [4], [7], [12]

2.3 Vektorový magnetický potenciál

Pro zjednodušení řešení magnetického pole se zavádí nová veličina, vektorový magnetický potenciál \mathbf{A} [$\text{T}\cdot\text{m} = \text{Wb}\cdot\text{m}^{-1} \equiv \text{Vs}\cdot\text{m}^{-1}$].

Nejprve si nadefinujeme vztah platný pro celý prostor, tedy $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$. Tímto krokem docílíme možnosti popsání vektoru \mathbf{B} jiným vektorem a následného zjednodušení řešení pro magnetická pole. Jelikož vždy platí vztah (2.7),

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = \operatorname{div} \operatorname{rot} \mathbf{A} = 0 \quad (2.7)$$

nebo podle jiného zápisu

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{A} = 0 \quad (2.8)$$

lze vektorový magnetický potenciál \mathbf{A} definovat podle následujícího vztahu

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}. \quad (2.9)$$

Jak uvádí Helmholtzova poučka pro jednoznačné přiřazení dvou vektorových polí, je nutné stanovit jak rotaci, tak i divergenci. Nyní nám zbývá určit $\operatorname{div} \mathbf{A}$. Pro odvození divergence vektorového magnetického potenciálu se použije vztah (2.10),

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (2.10)$$

který definuje vztah mezi vektorem pole a zdrojem. Dále se provede matematická úprava rotace obou stran rovnice (2.9) a dosazení do rovnice (2.10).

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{A} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (2.11)$$

K další úpravě je nutné znát vztah vektorové algebry (2.12),

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{A} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{A} - \nabla^2 \mathbf{A} \quad (2.12)$$

který se dosadí do (2.11). Výsledný vztah vypadá následovně

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{J}. \quad (2.13)$$

Pro zjednodušení vztahu (2.13) se použije vztah $\operatorname{div} \mathbf{A} = 0$ a podle Coulombovy podmínky se dostane vztah

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{J}, \quad (2.14)$$

který se nazývá Poissonova vektorová rovnice.

V případě oblasti bez zdrojů platí pro vektorový potenciál Laplaceova rovnice

$$\nabla^2 \mathbf{A} = 0 \quad (2.15)$$

Partikulárním řešením rovnice (2.14) bude

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_V \frac{\mathbf{J}}{r} dV + \mathbf{K}, \quad (2.16)$$

kde \mathbf{K} označuje vektorovou konstantu.

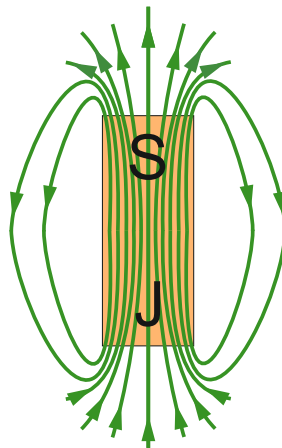
Za předpokladu tenkých vodičů o konstantním průřezu dostaneme upravením rovnice (2.16) následující tvar. [7], [12]

$$d\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l}}{r} + \mathbf{K} \quad (2.17)$$

2.4 Indukční čáry

Při grafickém znázornění elektrického pole se využívají elektrické siločáry. Pro magnetické pole se postupuje obdobně, znázorňuje se však pomocí indukčních čar. Vektor magnetické indukce \mathbf{B} je vždy tečný k indukční čáře.

Pro názornou ukázkou jsou na obr. 5 zobrazeny indukční čáry u tyčového magnetu. Indukční čáry procházejí magnetem, jedná se o uzavřené prostorové křivky, tedy o křivky, které nikde nezačínají, ani nikde nekončí. Místo, kde indukční čáry vystupují z tyčového magnetu, se nazývá severní pól. Naopak na druhém konci tyčového magnetu se nachází jižní pól a indukční čáry zde vstupují do magnetu. [4]



Obrázek 5: Indukční čáry tyčového magnetu

2.5 Magnetický tok

Z vektorové analýzy je známý termín tok vektoru plochou. Jev, při kterém plochu S protíná vektor magnetické indukce \mathbf{B} , se označuje jako magnetický tok Φ a uvádí se v jednotkách weber [Wb] nebo ve voltsekundách [Vs]. [4]

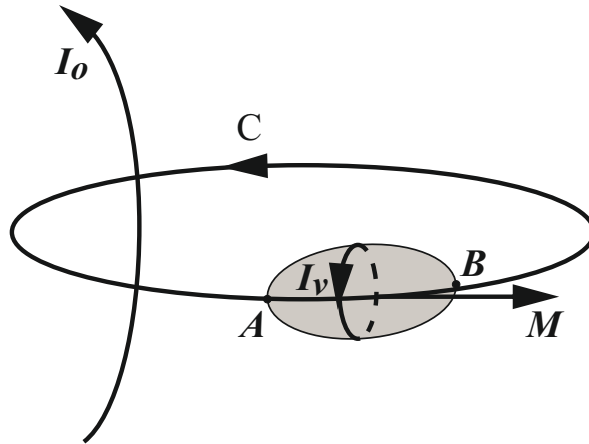
$$\Phi = \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (2.18)$$

2.6 Intenzita magnetického pole

Pro odvození intenzity magnetického pole se použije Ampérův zákon, který na pravé straně obsahuje volné proudy I a je rozšířen o vázané proudy I_v .

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0(I + I_v) \quad (2.19)$$

Dále si uvedeme vektor magnetizace \mathbf{M} , který lze formulovat jako objemovou hustotu magnetických momentů. Pro názornější vysvětlení se vychází z obr. 6. Na něm cirkulace vektoru \mathbf{B} obepíná volný proud I_o ve vodiči a zároveň prochází zmagnetizovaným předmětem s magnetizací \mathbf{M} .



Obrázek 6: Cirkulace \mathbf{B} kolem vodiče s I_o

Pomocí integrace je řešena křivka mezi body A a B zmagnetizovaného tělesa a následně je dosazena do vztahu (2.19).

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0(I + I_v) = \mu_0 I_o + \mu_0 \int_A^B \mathbf{M} \cdot d\mathbf{l} \quad (2.20)$$

Magnetizace dosahuje nulových hodnot pro okolí tělesa, z toho důvodu uvažujeme vztah

$$\int_A^B \mathbf{M} \cdot d\mathbf{l} = \oint_C \mathbf{M} d\mathbf{l}, \quad (2.21)$$

který dosadíme do rovnice (2.20).

$$\oint_C \frac{\mathbf{B}}{\mu_o} - \mathbf{M} \cdot d\mathbf{l} = I_o \quad (2.22)$$

Vektor intenzity magnetického pole se značí symbolem \mathbf{H} a je udáván v jednotkách ampér na metr [A/m].

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_o} - \mathbf{M} \quad (2.23)$$

Následným matematickým odvozením dostaneme vztah, který označujeme jako Ampérův zákon pro magnetikum.

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I_o \quad (2.24)$$

Za předpokladu, že magnetické vlastnosti materiálu jsou lineární a isotropní, lze magnetizaci \mathbf{M} tělesa vypočítat podle následujícího vztahu

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}, \quad (2.25)$$

kde symbol χ_m označuje magnetickou susceptibilitu. Po dosazení do rovnice (2.23) se dostane následující rovnice

$$\mathbf{B} = \mu_o(1 + \chi_m)\mathbf{H} = \mu_r\mu_o\mathbf{H} = \mu\mathbf{H}. \quad (2.26)$$

Symbol μ_o označuje permeabilitu vakua, μ_r je relativní permeabilita a μ je celková permeabilita. [12]

2.7 Faradayův indukční zákon

Po prokázání, že stacionární elektrický proud je doprovázen magnetickým polem, bylo otázkou, jestli je magnetické pole schopné vybudit elektrický proud.

Až teprve Faraday dokázal, že pokud máme časově proměnné magnetické pole, tak na uzavřeném obvodu vznikne elektromotorické napětí, které vybudí elektrický proud. Pro Faradayův indukční zákon platí, že na uzavřené smyčce c se indukuje elektromotorické napětí, které se rovná zápornému podílu magnetického toku ku časové derivaci.

$$U_e = \oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_c}{dt} \quad (2.27)$$

U rovnice (2.27) lze pravou stranu přepsat pomocí magnetické indukce \mathbf{B} . [12]

$$U_e = \oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (2.28)$$

2.8 Vlastní indukčnost

Vodič vytváří kolem sebe magnetické pole za předpokladu, že vodičem prochází proud I . Podle vzorce (2.18) se tedy cívka stává zdrojem magnetického toku Φ_c

$$\Phi_c = N\Phi, \quad (2.29)$$

Symbol N v předešlém vzorci označuje počet závitů cívky a Φ značí magnetický tok pro jednotlivý závit.

Za předpokladu lineárního prostředí, lze cívkový tok Φ_c vyjádřit podle následujícího vzorce.

$$\Phi_c = LI \quad (2.30)$$

Nově vyjádřená veličina

$$L = \frac{\Phi_c}{I}, \quad (2.31)$$

se nazývá indukčnost a jednotkou je henry [H]. Jedná se o veličinu, která má integrální charakter, tudíž nepopisuje jednotlivé body v prostoru. Z toho důvodu dvě rozdílné cívky mohou mít stejnou hodnotu indukčnosti L . [12]

2.9 Vzájemná indukčnost

Pokud je na primární cívce vybuzen cívkový magnetický tok Φ_{12c} proudem I_1 , který prochází sekundární cívkou, tak se tento jev označuje jako vzájemná indukčnost. Symbol Φ_{21c} je část magnetického toku Φ_{12c} , který prochází sekundární cívkou. Pro výpočet vzájemné indukčnosti se využívá následující vzorec, veličinou je henry [H].

$$M_{12} = M_{21} = \frac{\Phi_{12c}}{I_1} = \frac{\Phi_{21c}}{I_2} \quad (2.32)$$

Pokud platí, že pro každý závit je stejný magnetický tok, lze použít pro výpočet cívkového magnetického toku rovnici $\Phi_{12c} = N_2\Phi_{12}$. [12]

3 Průtokoměry

V technické praxi se pro měření tekutin využívají různé typy průtokoměrůných čidel (dále jen průtokoměry). Princip průtokoměru spočívá v transformaci průtoku tekutiny na fyzikální veličinu, která je funkčně závislá na rychlosti proudění nebo na kinetické energii tekutiny.

Průtokoměry se dělí do skupin s přímým nebo nepřímým měřením. Do přímých měření se řadí objemové nebo hmotnostní měření průtoku tekutiny, které jsou založeny na principu odměrných nádob. Druhá majoritní skupina nepřímých měření je založena na závislosti rychlosti nebo kinetické energie tekutiny na výstupní veličině průtokoměru.

Průtokoměry, které jsou založeny na rychlostní metodě, se dělí na senzory s konstantním průtočným průřezem nebo na senzory s konstantní střední rychlostí proudění. První skupina tvoří převážnou část používaných průtokoměrů a měří okamžitou střední rychlost proudění. Do této skupiny jsou zahrnuty typy průtokoměrů se škrťacími orgány, ultrazvukové, turbínové, indukční (elektromagnetický a magnetoelektrický) apod. Do skupiny s konstantní střední rychlostí proudění se zahrnují plovákové průtokoměry a jejich modifikace.[2]

3.1 Elektromagnetický průtokoměr

Pro vysvětlení principu vzniku napětí na elektrodách při proudící tekutině v magnetickém poli se využívá Faradayův indukční zákon (kap. 2.7). Z tohoto důvodu jsou průtokoměry označovány jako indukční. Pro lepší vysvětlení principu odvodíme vznik napětí na elektrodách pomocí Lorentzova zákona (kap.2.2). Dále si podle fyzikálního významu můžeme indukční průtokoměry rozdělit na elektromagnetické a magnetoelektrické. V dalších kapitolách se budeme zabývat pouze elektromagnetickými průtokoměry.[2]

3.1.1 Princip elektromagnetického průtokoměru

Jak již bylo řečeno většina odborné literatury se pro vysvětlení principu indukčních průtokoměrů opírá o Faradayův indukční zákon (kap. 2.7). Takže napětí U vzniká na elektrodách za předpokladu časově proměnného magnetického pole působícího na proudící tekutinu.

Pro odvození rovnice pro výpočet napětí U na elektrodách a vysvětlení principu elektromagnetického průtokoměru použijeme Lorentzův zákon, který je vysvětlen v kapitole 2.2. Zde je vysvětleno, že na náboj q pohybující se v magnetickém poli o magnetické indukci \mathbf{B}

působí magnetická síla \mathbf{F}_m podle rovnice (2.4) a na náboj v elektrickém poli o intenzitě \mathbf{E} má ještě vliv elektrická síla \mathbf{F}_e (2.5).

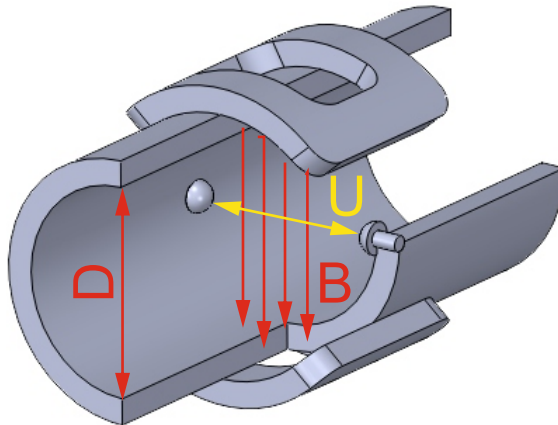
Směr působení magnetické síly \mathbf{F}_m působící na náboj q s rychlostí \mathbf{v} se určuje podle pravidla pravé ruky. Dochází k vychylování nábojů q mezi elektrodami a k následnému rozdílu potenciálu (napětí U mezi elektrodami). Pokud je intenzita elektrického pole \mathbf{E} tvořena homogenním polem, lze definovat poměr mezi napětím U (mezi elektrodami) a průměrem potrubí D .

$$|\mathbf{E}| = \frac{U}{D} \quad (3.1)$$

Pokud se elektrická síla \mathbf{F}_e rovná magnetické síle \mathbf{F}_m , lze napětí U mezi elektrodami určit podle následujícího vztahu

$$U = v \cdot B \cdot D. \quad (3.2)$$

Už z Lorentzova zákona plyne pro tuto rovnici, že vektory \mathbf{v} a \mathbf{B} jsou na sebe kolmé a tvoří rovinu, ke které je osa elektrod D kolmá. [2]



Obrázek 7: Princip elektromagnetického průtokoměru, U – napětí mezi elektrodami, B – směr magnetické indukce, D – průměr potrubí

3.1.2 Vlastnosti elektrod

V indukčních průtokoměrech se využívají elektrody, které jsou buď v přímém, nebo nepřímém kontaktu s měřenou tekutinou. Pro elektrody s přímým kontaktem s tekutinou platí, že jsou častěji používané a dělí se na vyměnitelné nebo na pevně připevněné. Levnější variantou

jsou pevné elektrody, které jsou vyrobeny z antikorozivních materiálů nebo se vyrábí spékáním platiny s keramickou výstelkou. Elektrody s nepřímým kontaktem s měřenou tekutinou jsou tvořeny pomocí kapacitně vázaných elektrod. [2]

3.1.3 Vlastnosti magnetického pole

Pro vysvětlení principu indukčního průtokoměru bylo uvažováno o magnetickém poli jako o homogenním poli. Ve skutečnosti má magnetické pole charakter homogenního pole pouze pro určitý úsek podél osy potrubí. Na ostatní úseky potrubí už magnetické pole nepůsobí, a dokonce jsou příčinou ke snižování napětí U , jelikož vodivá kapalina působí jako paralelně zapojená zátěž. Z toho vyplývá, že rozložení potenciálu má axiální rozložení a ke konci úseku vystaveného magnetickému poli dochází ke snižování napětí. Pro dosažení největšího napětí U se elektrody umísťují uprostřed úseku, který je exponován magnetickým polem.

Průměr potrubí značně ovlivňuje výsledné axiální rozložení magnetického pole. Rozdíl magnetické indukce \mathbf{B} mezi kraji a středem osy elektrod je pro menší průměry větší, než je tomu pro velké průměry potrubí. Zvýšení citlivosti průtokoměrů lze dosáhnout použitím silnějšího magnetického pole. Je zcela patrné, že silnějšího magnetického pole jednodušeji dosáhneme u malých průměrů potrubí kvůli menší vzduchové mezeře. Stejně hodnoty magnetického pole, které mají potrubí s malými průměry, lze dosáhnout zvýšením výkonu budičích cívek u potrubí s velkými průměry. Pokud se začne výsledné napětí U vypočítávat podle vzorce (3.2). Je patrné, že vliv rozdílu hodnot magnetického pole pro malé a velké průměry není tak zásadní, jelikož napětí U je úměrné délce mezi elektrodami.

Pokud na krajích působení magnetického pole dochází k rychlému poklesu magnetické indukce \mathbf{B} , pak může docházet ke vzniku vířivých proudů v tekutině. [2]

3.1.4 Vlivy působící na citlivost čidla

Dalším faktorem ovlivňujícím indukční průtokoměry je vodivost měřené tekutiny. Hraňiční měřitelná hodnota vodivosti se uvádí $\sigma = 0,1 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, ale nejčastěji průtokoměry pracují při hodnotě $\sigma = 5 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$. Takové kapaliny jako např. benzín a deionizovaná voda nelze změřit kvůli nízké hodnotě vodivosti. Pro speciální případy použití byly vyvinuty průtokoměry, které jsou schopné měřit průtoky dielektrických látek. [2]

Pro indukční průtokoměry je charakteristické, že jejich citlivost je závislá na magnetickém poli. Podle vlivu na magnetické pole se materiály rozdělují do tří základních skupin: diamagnetické, paramagnetické a feromagnetické. Diamagnetické materiály mají $\mu_r < 1$ a magnetické pole mírně zeslabují. Paramagnetické materiály nepatrně zvětšují magnetické pole a pro relativní permitivitu platí $\mu_r > 1$. Poslední skupinou jsou feromagnetické materiály, které silně zvětšují magnetické pole a relativní permitivita je mnohem větší než jedna ($\mu_r \gg 1$).

U indukčních průtokoměrů se nejčastěji feromagnetické materiály používají na kryt průtokoměru a pro svorníky cívek. Paramagnetické nebo i diamagnetické materiály se používají na zbylé prvky průtokoměru. [12]

4 Matematické řešení elektromagnetického pole

Nechť je dána obecná úloha, kterou si nadefinujeme jako oblast V . Matematickou metodou hledáme komplexní skalární funkci (fázor) f uvnitř oblasti V , která bude splňovat rovnice (4.1) a (4.2).

$$L(f) = G \quad \text{uvnitř oblasti } V \quad (4.1)$$

$$\Lambda(f) = \Gamma \quad \text{na hranici } \partial V \quad (4.2)$$

Pro tuto hraniční úlohu platí, že řešení lze zapsat pomocí nekonečné sumy.

$$f = \sum_{n=1}^{\infty} a_n f_n \quad (4.3)$$

Symbol a_n označuje hledané koeficienty a f_n jsou zvolené báze funkce definované uvnitř oblasti V . Za předpokladu řešení obecné úlohy numerickou metodou je cílem nalezení přibližné řešení úlohy. Proto musí platit pro rozvoj (4.3), že obsahuje konečný počet prvků

$$f = \sum_{n=1}^N a_n f_n + \eta. \quad (4.4)$$

Výsledkem je přibližné řešení, které se blíží k přesnému řešení pouze s určitou přesností. Chyba aproximace je označena η . Z toho vyplývá, že přibližné řešení není jednoznačně dané. V závislosti na velikosti chyby řešení je možné získat více variant řešení pro obecnou úlohu. Přibližné metody řešení lze rozdělit na čtyři základní skupiny:

1. **analytické metody** – metodou se nalezne takové řešení, které splňuje rovnice (4.1) a (4.2) ve všech bodech řešené oblasti V a zároveň i na hranici ∂V . Pro nalezení řešení lze použít metodu MMP – mode matching technique („sešívání vidů“)
2. **semianalytické metody** – u semianalytických metod platí pro báze funkce v rozvoji (4.3), že hraniční podmínku (4.2) splňují jen přibližně, ale rovnici (4.1) splňují přesně. Zástupcem metody je MMP – multiple multipoles (vícenásobné mnohopóly).
3. **seminumerické metody** – pro báze funkce rozvoje platí, že splňují vlastní diferenciální rovnici (4.1) jen přibližně, ale hraniční podmínku (4.2) splňují přesně. Příkladem seminumerické metody je BEM – boundary element method (metoda hraničních prvků).

4. **numerické metody** – bázové funkce rozvoje (4.3) nesplňují jak hraniční podmínku (4.2), tak ani nejsou řešením rovnice (4.1). Metoda se používá při hledání přibližného řešení u nehomogenních prostředí nebo u složitých geometrií v oblasti V . Typickými zástupci numerických metod jsou FEM – finite element method (metoda konečných prvků), FDTD – finite difference in time domain (metoda hraničních prvků) a FIT – finite integration technique (metoda konečné integrace). [10]

4.1 FEM – metoda konečných prvků

Matematická metoda konečných prvků se nepoužívá pouze na řešení elektromagnetického pole, ale i na ostatní fyzikální úlohy jako např. proudění tekutin nebo deformaci tělesa. Výsledné řešení fyzikální úlohy je vyjádřeno pomocí diferenciálních rovnic s okrajovými podmínkami.

Při řešení elektromagnetického pole pomocí metody konečných prvků se používá některá z následujících rovnic:

Elektrostatické pole popsané pomocí Poissonovy rovnice, kde řeší potenciál φ v oblasti s prostorovým nábojem o objemové hustotě ρ [$\text{C}\cdot\text{m}^{-3}$].

$$-\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \varphi) = \rho \quad (4.5)$$

Magnetostatické pole je vyjádřeno vektorovým magnetickým potenciálem \mathbf{A} v oblasti, kde působí proudová hustota \mathbf{J} [$\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$].

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (4.6)$$

Nestacionární harmonické pole je řešeno v prostředí s permeabilitou μ a komplexní permitivitou ε_k , kde fázory vektorů elektrického a magnetického pole s vnuceným proudem o proudové hustotě \mathbf{J}_{vn}

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{E} \right) - \omega^2 \varepsilon_k \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{J}_{vn} \quad (4.7)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon_k} \nabla \times \mathbf{H} \right) - \omega^2 \mu \mathbf{H} = \nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon_k} \mathbf{J}_{vn} \right) \quad (4.8)$$

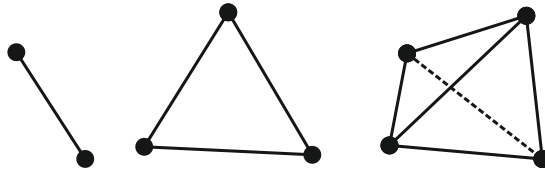
K samotnému řešení se používá Ritzova variační metoda a Galerkinova metoda. Za použití těchto metod se dosahuje funkce $\tilde{\Phi}$, která se nejvíce přibližuje skutečnému řešení Φ .

$$\tilde{\Phi} = \sum_{i=1}^N c_i v_i \quad (4.9)$$

Symbol c_i označuje reálné konstanty a v_i báze funkce. [10]

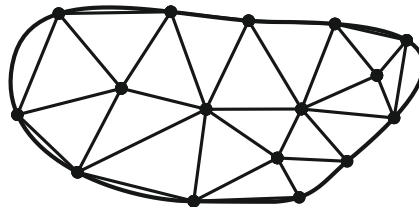
4.1.1 Diskretizace oblasti

Při řešení úlohy pomocí metody konečných prvků se začíná nejprve rozdělením řešené oblasti Ω na jednotlivé elementy. Tvar elementu se volí podle dimenze řešené úlohy. Pro jednorozměrné dimenze (1D) je simplexem (nejjednodušší geometrický útvar elementu prvku) úsečka. Trojúhelníkový tvar prvku je nejjednodušším geometrickým tvarem pro dvourozměrné dimenze (2D) a pro třírozměrné dimenze (3D) se užívá tvar prvku čtyřstěnu. Jednotlivé tvary prvků jsou zobrazeny na obr. 8, kde jsou ještě silně zobrazeny body, které se označují jako uzly.



Obrázek 8: Tvary elementů

Hustota prvků diskretizované oblasti Ω ovlivňuje nejen výpočetní náročnost, ale i přesnost numerického řešení. Pro diskretizaci oblasti Ω platí, že uzly sousedních prvků musí být souhlasné a navzájem se nepřekrývat. [10] [6]



Obrázek 9: Diskretizovaná oblast Ω

5 Programové prostředí pro výpočet FEM

Z hlediska dostupnosti dostatečného výpočtového výkonu se simulace využívají čím dál více v různých technických oborech. Nalezení uplatnění simulací není tedy pouze v automobilovém průmyslu, ale třeba i ve stavebnictví nebo v dalších technických oborech, kde řeší různé fyzikální úlohy.

Většina používaných programů využívá pro výpočet simulací metodu konečných prvků – FEM. Samotný postup simulace v programových prostředích je rozdělen na tři základní kroky: pre-processing, processing – solution a post-processing. V prvním kroku pre-processing se vytvoří geometrie úlohy a vytvoří se síť (mesh) pomocí vhodného tvaru prvku pro následné vypočtení pomocí metody FEM. Nakonec se nastaví fyzikální vlastnosti tělesa. V kroku processing se vypočte simulace pomocí numerické metody FEM. Posledním krokem je post-processing, kde se zpracovávají vypočtené výsledky simulace. Jako zástupce těchto programů lze uvést např. Ansys, Comsol Multiphysics, Unigraphics atd. [6]

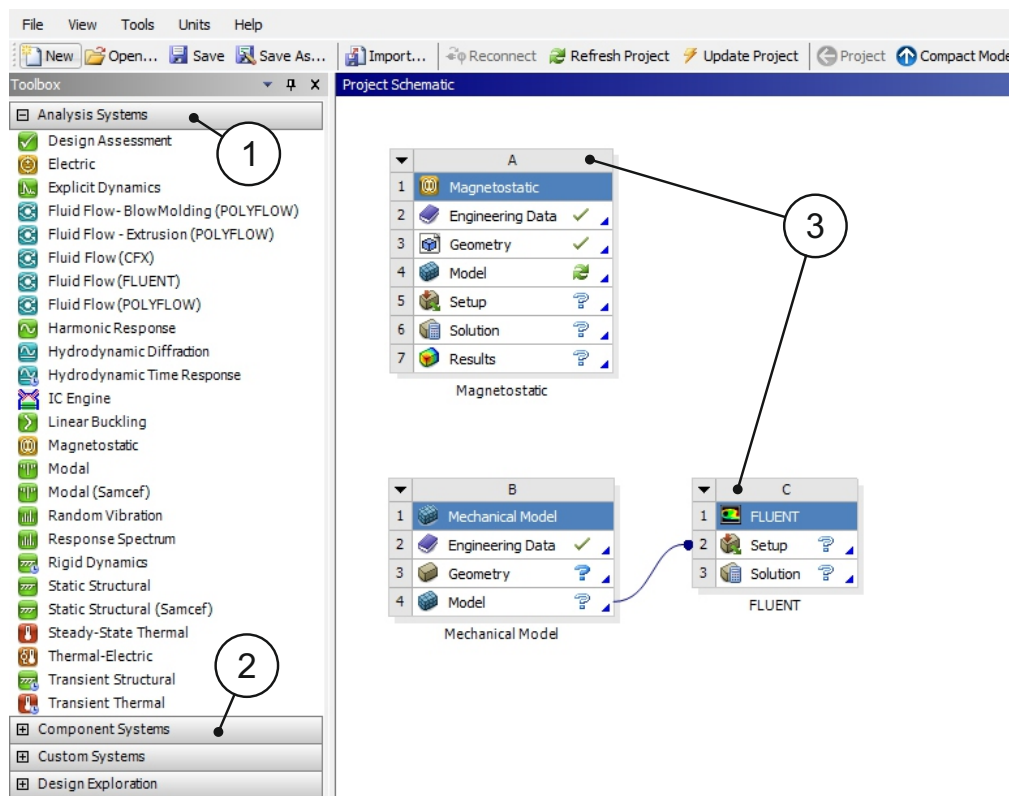
5.1 Ansys

Program Ansys je vyvíjen firmou Ansys, která byla založena v roce 1970. V programu je možné se pohybovat ve dvou vývojových prostředích. První prostředí se označuje jako „native“ a jedná se o starší prostředí programu. Novějším prostředím je Workbench, kde je možné použít již předem nadefinované systémy z Analysis Systems, nebo si jej složit z jednotlivých částí – Component Systems. Na obr. 10 je zobrazeno vývojové prostředí workbench, kde je zvolen systém Magnetostatic. Skládá se ze šesti částí, kde první až čtvrtá část patří do kroku pre-processing, pátá část patří do kroku processing a poslední šestá část do post-processing.

Nyní si vysvětlíme jednotlivé části ze systému Magnetostatic:

1. **Engineering data** – knihovna nadefinovaných materiálů, kterou lze rozšířit o vlastní materiály
2. **Geometry** – geometrii modelu lze vytvořit v programu Ansys nebo importovat z CAD programů
3. **Model** – nastavuje se mesh modelu (zasítování modelu)

4. **Setup** – nastavují se fyzikální vlastnosti modelu
5. **Solution** – vypočítává se simulace pomocí FEM
6. **Results** – výsledné zpracování simulace

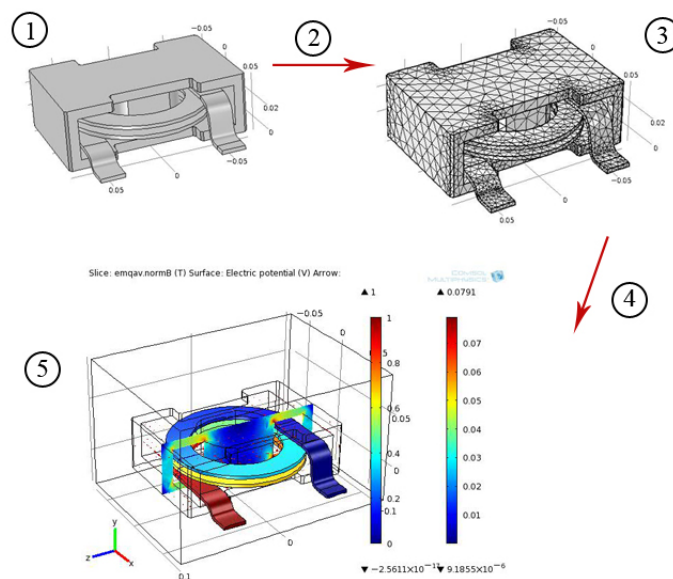


Obrázek 10: Program Ansys v prostředí workbench: 1. Výpis nadefinovaných systémů z Analysis systems, 2. Component systems pro složení vlastního systému, 3. Aktuální projekt se systémy Magnetostatic a Fluent

5.2 Comsol Multiphysics

Program Comsol Multiphysics využívá pouze jedno vývojové prostředí a samotný program se dělí na jednotlivé moduly podle řešené úlohy. Mezi moduly patří např. AC/DC modul (řešení působení stejnosměrného a střídavého proudu), CFD modul (řeší proudění tekutin), import modul (umožňuje import geometrie z CAD programů) a ostatní moduly (RF modul, MEMS modul, Acoustics modul atd.).

Při řešení simulací v programu Comsol Multiphysics se u většiny modulů postupuje obdobně. Nejprve si volíme space dimension (dimenzi prostředí: 1D, 2D a 3D), následuje zvolení physics podle typu fyzikální úlohy a nakonec se volí study type (časový průběh studie). Na obr. 11 je zobrazen postup řešení simulací v programu Comsol Multiphysics. Opět do skupiny pre-processing patří body jedna až tři. Bod čtyři patří do skupiny processing a poslední bod pět do post-processing.



Obrázek 11: Zobrazený postup v COMSOL Multiphysics – 1. Geometry, 2. Physics, 3. Mesh, 4. Solution, 5. Result [13]

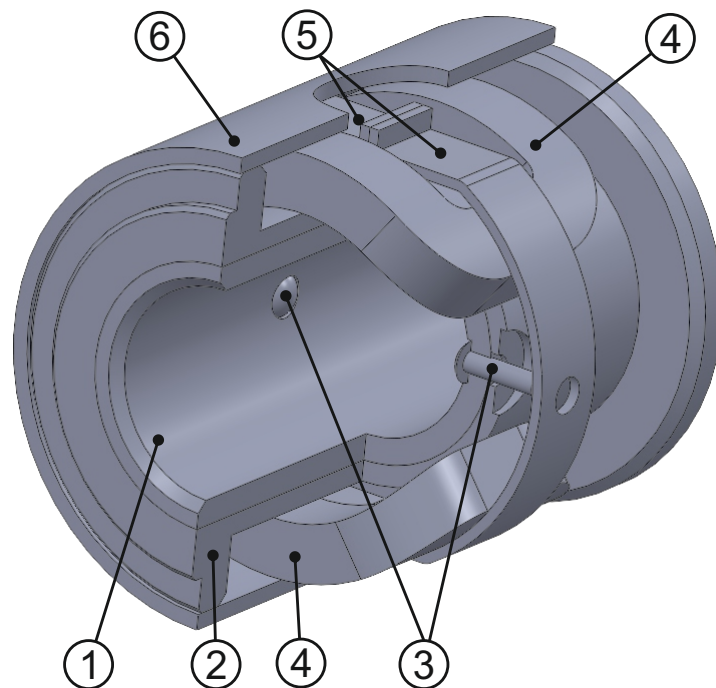
Po předcházejícím obrázku si vysvětlíme jednotlivé kroky postupu:

1. **Geometry** – program Comsol umožňuje vytvoření vlastní geometrie i její importování z CAD programů
2. **Physics** – nastavení fyzikálních vlastností modelu a okrajových podmínek
3. **Mesh** – vytvoření sítě pro FEM
4. **Solution** – vypočtení simulace
5. **Result** – výsledné zpracování simulace

6 Vytvoření geometrie modelu v CAD programu

Úvodním krokem v pre-processing je vytvoření geometrie simulovaného modelu. Oba programy jak Ansys, tak i Comsol Multiphysics obsahují interní funkce pro vytvoření požadované geometrie modelu. Pro efektivnější práci s geometriemi byla použita metoda, kde se geometrie vytvořily v externím programu a následně byly importovány do programů Ansys a Comsol Multiphysics. Pro vytvoření geometrií v externím programu byl firmou BK Technic s.r.o. propůjčen CAD program SolidWorks. Od firmy LIMESA meters s.r.o. byl zapůjčen elektromagnetický průtokoměr DN40 s jeho katalogovými listy [9].

Podle katalogových listů a elektromagnetického průtokoměru DN40 byla vytvořena původní neboli výchozí geometrie. Dále bylo pro simulace připraveno dalších sedm geometrií. Všechny geometrie jsou složeny ze šesti částí, které jsou zobrazeny na obr. 12. Z toho jsou čtyři části (vnitřní izolační trubka, vnější trubka, elektrody a kryt) stejné pro všechny použité geometrie. Elektrody se zahrnují do geometrií pouze pro simulace obsahující proudění kapalin. Jednotlivé geometrie se liší pak v budicích cívkách a svornících na budicí cívky.



Obrázek 12: Původní průtokoměr DN40 – 1. vnitřní izolační trubka, 2. vnější trubka, 3. elektrody, 4. budicí cívky, 5. svorníky budicích cívek, 6. kryt průtokoměru

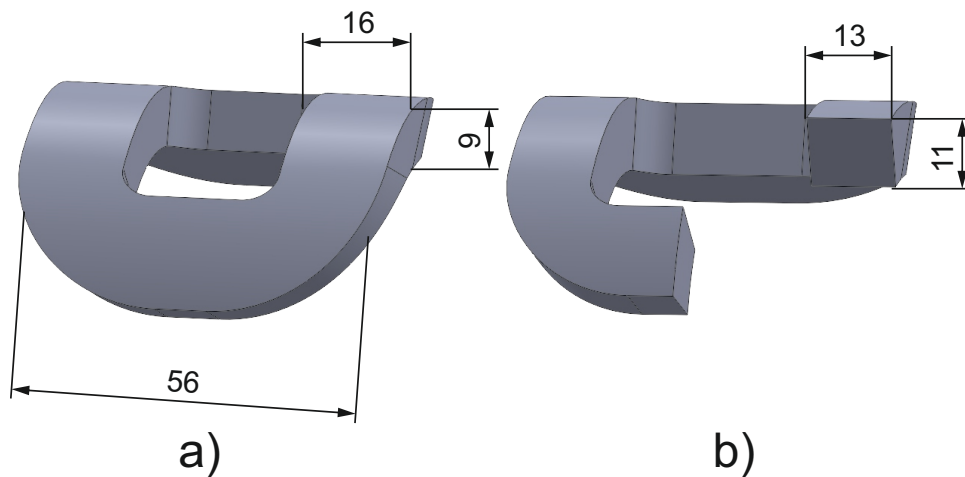
6.1 Modifikace geometrií budicích cívek DN40

V této kapitole se geometrie průtokoměru od sebe odlišují pouze změnou geometrie budicí cívky. Pro simulace bylo připraveno celkem pět různých geometrií budicích cívek, z toho jedna geometrie budicí cívky (výchozí geometrie) odpovídá reálné budicí cívce a zbylé čtyři geometrie budicích cívek jsou modifikacemi výchozí budicí cívky. Všechny vytvořené geometrie budicích cívek se od sebe odlišují minimálně v jednom rozměrovém parametru. Mezi rozměrové parametry patří: podélná šířka budicích cívek, rozměry průřezu vinutí a úhel výseče vzduchové mezery. Jednotlivé parametry jsou zobrazeny na obr. 13 a obr. 14 a vysvětleny v následujících kapitolách.

Z důvodu porovnání s původním provedením bylo vhodné dodržet pro nové provedení cívek následující dvě kritéria. První kritérium bylo dodržení odporu vinutí, které se mělo pohybovat v rozmezí od $40\ \Omega$ do $55\ \Omega$. Druhé kritérium předepisovalo počet závitů ve vinutí, tedy $N = 1100$. U některých variant geometrií budicích cívek byla prodloužena středová délka vinutí způsobená mechanickými úpravami. Z důvodu splnění dvou kritérií bylo nutné podle vzorců (6.1) a (6.2) zvětšit průměr měděného drátu. Průměr drátu byl zvětšen z $0,28\ \text{mm}$ na $0,315\ \text{mm}$, a proto se zvětšil i obsah průřezu vinutí oproti výchozímu obsahu.

6.1.1 Geometrie budicích cívek s průměrem drátu $0,28\ \text{mm}$

S průměrem drátu $0,28\ \text{mm}$ byly připraveny dvě geometrie budicích cívek. První geometrie (výchozí geometrie) byla vytvořena pomocí výrobního výkresu a její rozměr průřezu vinutí je $9 \times 16\ \text{mm}$. Při zachování stejného obsahu průřezu vinutí byla odvozena druhá geometrie. Její rozměr průřezu byl $11 \times 13\ \text{mm}$ s použitým drátem o průměru $0,28\ \text{mm}$. Obě geometrie mají stejný úhel výseče vzduchové mezery a podélnou šířku $56\ \text{mm}$, která je zobrazena na obr. 13.



Obrázek 13: Budicí cívky s drátem $\varnothing 0,28$ mm a podélnou šířkou 56 mm: a) s průřezem vinutí 9×16 mm, b) s průřezem vinutí 11×13 mm

6.1.2 Geometrie budicích cívek s průměrem drátu 0,315 mm

V této kapitole byly připraveny tři geometrie budicích cívek. Z důvodu využití prostoru průtokoměru mezi čely byly geometrie budicích cívek rozšířeny v podélné šířce na hodnotu 76 mm. Rozšířením byla prodloužena středová délka vinutí a nesplněno kritérium o odporu vinutí, které mělo být v rozmezí 40Ω až 55Ω . Proto byl použit drát o průměru 0,315 mm. Podle vzorce (6.1) byl vypočten nový obsah průřezu vinutí.

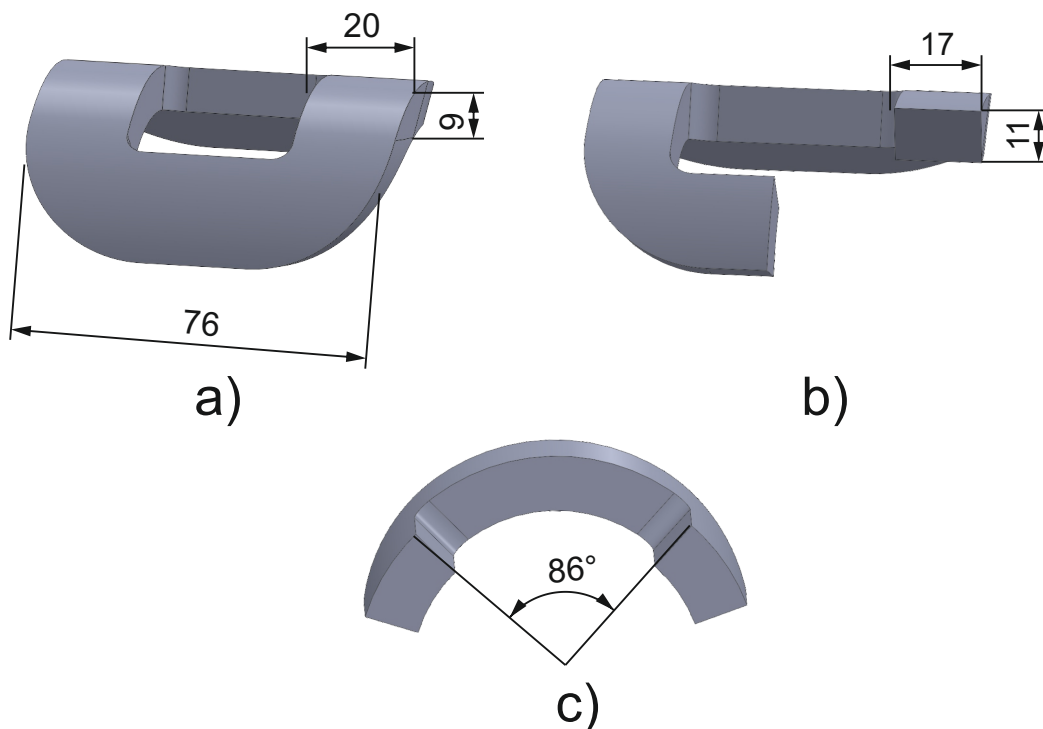
$$S = 2,2 N \pi r^2 \quad (6.1)$$

Nová hodnota obsahu průřezu byla 187 mm^2 , ze kterého byly odvozeny dvě varianty rozměru průřezu vinutí a to $9 \times 20,8$ mm a 11×17 mm. V závislosti na prodloužení středové délky vinutí byl průměr drátu zvětšen z 0,28 mm na 0,315 mm. Po zvětšení průměru drátu byla provedena kontrola odporu vinutí podle vzorce (6.2),

$$R = N \rho_M \frac{l}{S} \quad (6.2)$$

kde ρ_M je měrný odpor materiálu. Počet závitů budicí cívky je označen symbolem N . Symbol l definuje středovou délku vinutí a symbol S značí obsah průřezu vinutí. Prodloužené budicí cívky po kontrole splňovaly kritérium o odporu vinutí. Pro využití prostoru průtokoměru

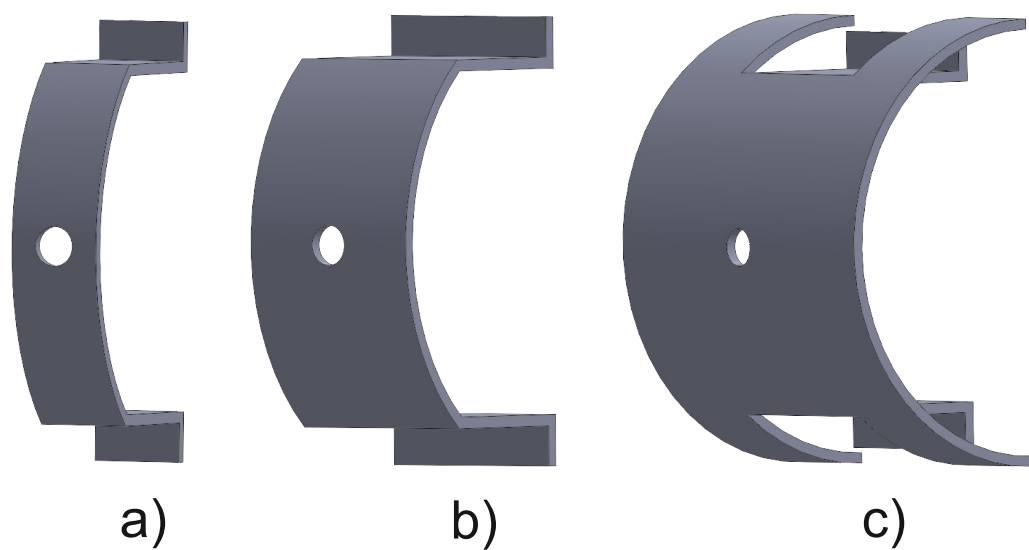
byla odvozena ještě jedna geometrie budicí cívky s rozměry průřezu 11×17 mm, u které se změnil úhel výseče vzduchové mezery. Předchozí geometrie budicích cívek měly úhel výseče 64° . U nové varianty se úhel výseče zvětšil na 86° . Všechny tři modifikace jsou zobrazeny na následujícím obr. 14.



Obrázek 14: Budicí cívky s drátem $\varnothing 0,315$ mm a podélnou šířkou 76 mm: a) s průřezem vinutí 9×20 mm, b) s průřezem vinutí 11×17 mm, b) s průřezem vinutí 11×17 mm se zvětšeným úhlem výseče 86°

6.2 Modifikované geometrie svorníků budicích cívek

Nejprve byla vytvořena výchozí geometrie svorníků na budicí cívky podle skutečného svorníku. Její podélná šířka byla 16 mm, která byla použita na všechny sestavy při vyhodnocování vlivu mechanického provedení tvaru budicích cívek. Dále byly vytvořeny další dvě geometrie svorníků, u kterých byla podélná šířka změněna na 34 mm a 70 mm. Na obr.15 jsou zobrazeny všechny tři varianty svorníků.

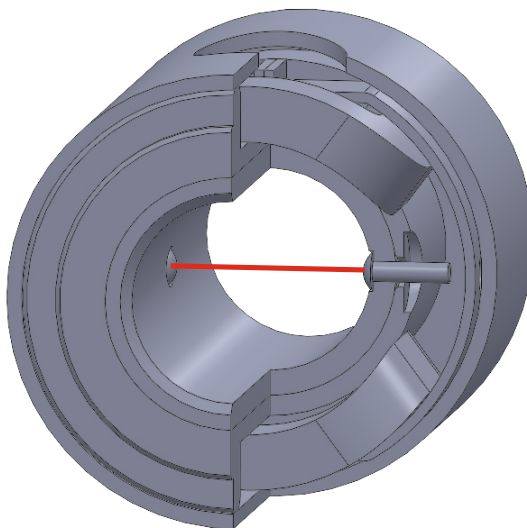


Obrázek 15: Svorníky budicích cívek s podélnou šířkou: a) 16 mm, b) 34 mm, c) 70 mm

7 Simulace

Pro simulace indukčního průtokoměru byly použity programy Ansys a Comsol Multiphysics, které pro výpočet využívají metodu konečných prvků (FEM). V prvním kroku preprocessing používají oba programy vlastní interní funkce pro import geometrií, jenž byly vytvořeny v programu SolidWorks. Z důvodu špatné kompatibility s výchozím formátem (*.sldasm) geometrií byly všechny geometrie převedeny do formátu STEP (*.step), který byl použit jak pro Ansys, tak i pro Comsol Multiphysics. Dalším společným faktorem pro oba programy je výběr použitých materiálů. Na obr. 12 je zobrazen průtokoměr DN40 s popsanými částmi. Na vnitřní izolační trubku je použit materiál teflon (dále jen PTFE). Stainless Steel (nerezová ocel) se využívá pro vnější trubku a elektrody. Pro kryt a svorníky budících cívek se aplikuje Structural Steel (konstrukční ocel) a budící cívky se definují pomocí materiálu měď (Cooper). Testovací kapalinou je voda (water) a celý průtokoměr je simulován v prostředí ze vzduchu (air).

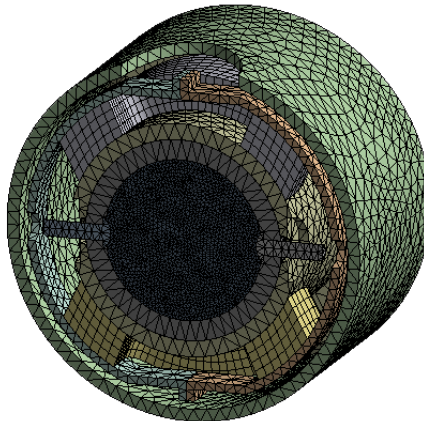
Vypočtené modely se porovnávají podle výsledného napětí U mezi elektrodami, který se vypočte podle vztahu (3.2). Na následujícím obr. 16 je zobrazena spojnice mezi elektrodami.



Obrázek 16: Zobrazená spojnice mezi elektrodami

7.1 Postup simulace v programu Ansys

Simulace byla provedena ve variantě Ansys Workbench. Nejprve byl založen nový projekt a z výběru Analysis Systems se vybral systém Magnetostatic. Prvním krokem bylo vybrání materiálů (Air, Cooper, PTFE, Stainless Steel, Structural Steel a Water) v záložce Engineering Data. Následující záložka je Geometry, kde byla použita funkce Import Geometry pro vložení zvolených geometrií. Pro jejich ohraničení okolního prostředí byla použita funkce Enclosure, která ještě podle nastavení vytvoří rovinu symetrie a pro výpočet se použije pouze polovina geometrie. Vytvoření sítě (Mesh) bylo provedeno v záložce Model a výsledný zasítovaný model je zobrazen na obr. 17. Pro nastavení fyzikálních zákonů v modelu je určena záložka Setup. Budicí cívky byly nadefinovány pomocí funkce Source Conductor, kde se nastavil počet závitů $N = 1100$ a budicí proud $I = 200 \text{ mA}$. Dále se nastavuje okrajová podmínka pomocí **Magnetic Flux paralel**. Pro další zpracování byly vypočtené hodnoty magnetické indukce \mathbf{B} na spojnici mezi elektrodami (obr. 16) exportovány do programu Matlab, kde podle vzorce (3.2) bylo následně vypočteno výsledné napětí U mezi elektrodami.



Obrázek 17: Zasítovaný model průtokoměru DN40 v Ansys Workbench

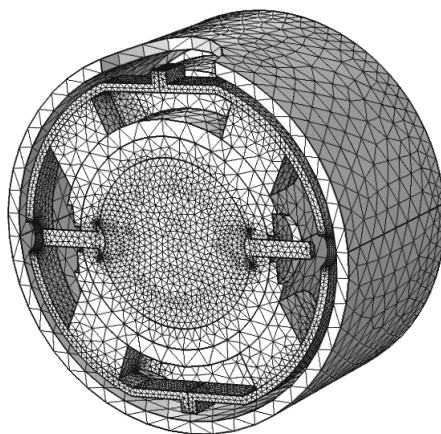
Pro simulace proudění kapalin jsou v programu Ansys určeny dva systémy (Fluent a CFX). V této práci byl zvolen pro simulaci proudění kapalin systém Fluent. V první záložce Problem Setup se nastavuje Model, kde se volí typ proudění (laminární a turbulentní). Dále Material pro vybrání materiálů z knihovny. V Cell Condition se pro prvky geometrie volí materiály z předem vybraných materiálů. V Boundary Condition se nastavují okrajové

podmínky modelu. Následující záložkou je Solution, kde se volí varianty řešiče a spouští se výpočet modelu. Result je poslední záložkou a slouží ke grafickému zobrazení výsledků. Odtud se následně exportují hodnoty rychlostního profilu mezi elektrodami do programu Matlab, ve kterém se hodnoty použijí pro výpočet napětí U podle vztahu (3.2).

7.2 Postup simulace v programu Cmsol Multiphysics

Program Cmsol Multiphysics nabízí pouze jedno uživatelské rozhraní oproti programu Ansys. Pro všechny modely vypočtené v programu Cmsol Multiphysics platí, že počítají s celou geometrií, protože je možné v jednom modelu zadat jak magnetické pole, tak i proudění kapalin. Při zakládání nového projektu se nejprve zvolila dimenze (1D, 2D a 3D) modelu, tedy pro simulaci průtokoměru dimenze 3D. Dalším krokem bylo vybrání fyzik z modulů (AC/DC module, Acoustic module, CFD module atd.). Z modulu AC/DC to byla fyzika Magnetic Field pro definování magnetického pole. Pro proudění kapalin byly použity fyziky Laminar Flow nebo Turbulent Flow z modulu CFD. Po vybrání fyzik bylo dokončeno základní nastavení nového projektu.

Menu pro nastavení simulace je rozděleno do tří základních skupin. První skupinou je Model (pre-processing), který obsahuje: Definition, Geometry, Materials, Physics (Magnetic Field, Laminar Flow nebo Turbulent Flow) a Mesh. V záložce Geometry se nejprve použila funkce Import Geometry a posléze se geometrie uzavřela do prostředí pomocí vytvoření kvádru (Block). V další záložce Materials se pro jednotlivé části průtokoměru nastavily vhodné materiály (teflon, nerezová ocel, konstrukční ocel, měď, voda a vzduch), jak bylo uvedeno v kapitole 7. Pro nastavení magnetického pole v záložce Magnetic Field je od nové verze (Cmsol Multiphysics 4.3a) možné použít funkce Multi-Turn Coil Domain pro budicí cívky, kde se nastavily hodnoty počtu závitů $N = 1100$ a budicí proud $I = 200 \text{ mA}$. Ve fyzikách proudění (Laminar Flow a Turbulent Flow) mimo nastavení ostatních okrajových podmínek je nutné nastavit hodnoty proudění při vstupu do potrubí (funkce Inlet) a pro hodnoty na konci potrubí funkcí Outlet. Poslední záložkou v této skupině je Mesh, kde se nastavila síť (Obr. 18) pro následný výpočet simulace.



Obrázek 18: Zasítovaný model průtokoměru DN40 v Comsol Multiphysics

Druhou skupinou je Study (processing). Jedná se o skupinu, kde se nastavoval výpočetní řešič dané simulace. Skupina Result je poslední skupinou v menu nastavení simulace. Patří do kategorie post-processing, kde se graficky zobrazují vypočtené výsledky ze simulace. Pomocí interních funkcí programu Comsol Multiphysics bylo vypočteno výsledné napětí U mezi elektrodami.

7.3 Vliv mechanických úprav průtokoměru na magnetické pole

Cílem studie indukčního průtokoměru bylo zesílení magnetického pole. Pro jeho zesílení byly provedeny mechanické úpravy na budicích cívkách a jejich svornících. Ostatní části průtokoměru nesměly být změněny. Nejprve byly řešeny simulace modifikovaných budicích cívek. Po vybrání nejvhodnější varianty budicí cívky byl následně na ní ověřen vliv mechanických úprav svorníků.

7.3.1 Vliv tvaru budicích cívek na magnetické pole

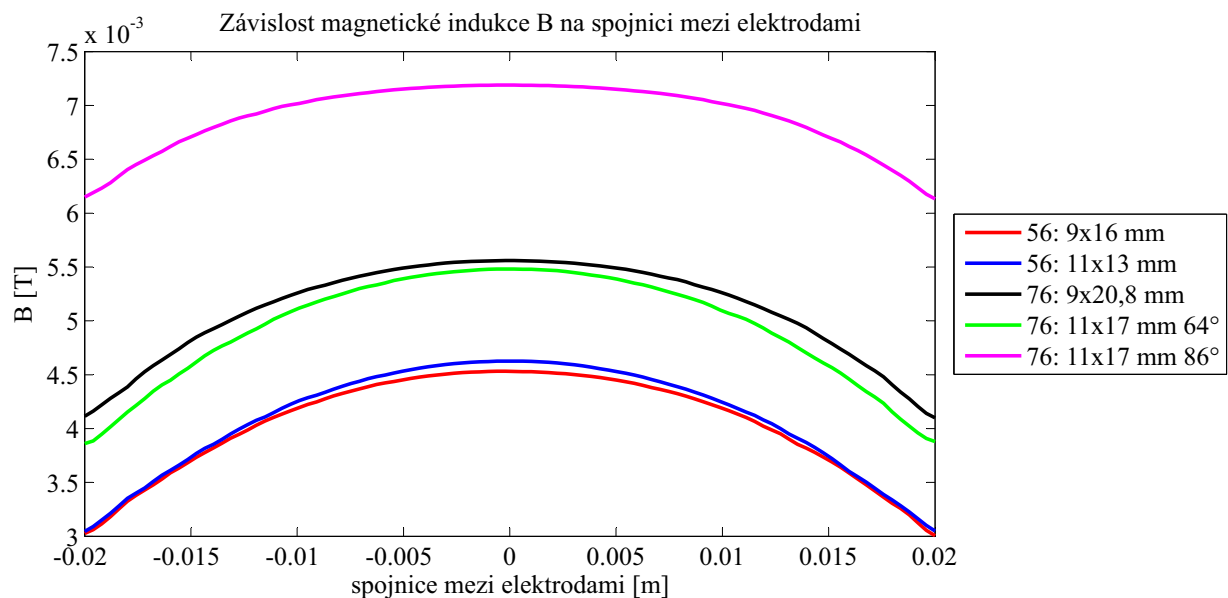
Pro studii vlivu mechanického provedení budicích cívek bylo připraveno pět geometrií. Z toho jedna geometrie vychází ze skutečné budicí cívky a čtyři ostatní jsou různými modifikacemi. Odlišují se od sebe v rozměrech průřezu vinutí (9×16 mm, 11×13 mm, $9 \times 20,8$ mm a 11×17 mm), v podélné šířce (56 mm a 76 mm) nebo v úhlu výseče vzduchové mezery budicí cívky (64° a 86°). Přesné popsání modifikací tvaru budicích cívek je v kapitole 6.1. Pro všechny budicí cívky byl použit svorník o podélné šířce 16 mm. V simulacích se zadával

počet závitů $N = 1100$ a budicí proud $I_B = 200 \text{ mA}$. Jednotlivé varianty budicích cívek byly porovnány podle výsledného napětí mezi elektrodami. Pro výpočet napětí U byl používán vzorec (3.2), kde do něj byl dosazen výsledek integrace magnetické indukce \mathbf{B} na spojnici mezi elektrodami (obr. 16) a maximální rychlost proudění ($v_{MAX} = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Tabulka 1: Výsledné hodnoty modifikovaných budicích cívek ($N = 1100$ a $I_B = 200 \text{ mA}$)

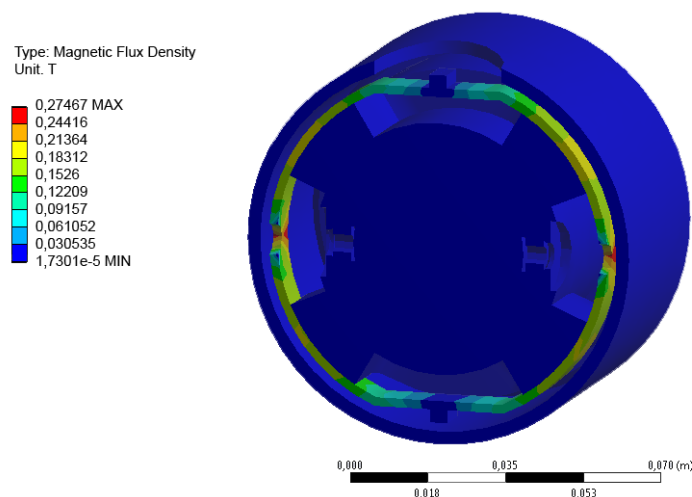
Typ cívky	$v \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}]$	$\mathbf{B} \times \mathbf{D} \text{ [mWb}\cdot\text{m}^{-1}]$		$U \text{ [mV]}$	
		Ansysis	Comsol	Ansysis	Comsol
9×16 mm se šířkou 56 mm	10	0,162	0,164	1,62	1,64
11×13 mm se šířkou 56 mm	10	0,164	0,164	1,64	1,64
9×20,8 mm se šířkou 76 mm	10	0,205	0,216	2,05	2,16
11×17 mm se šířkou 76 mm	10	0,198	0,199	1,98	1,99
11×17 mm se šířkou 76 mm – 86°	10	0,276	0,278	2,76	2,78

Rozložení magnetické indukce \mathbf{B} v závislosti na spojnici mezi elektrodami je zobrazeno na obr. 19. Na grafu je zcela patrné, důvod dosažení největšího napětí u varianty budicí cívky 11×17 mm se šířkou 76 mm a úhlem 86°. Zobrazení stejné závislosti, ale z programu Comsol Multiphysics, je v příloze A.

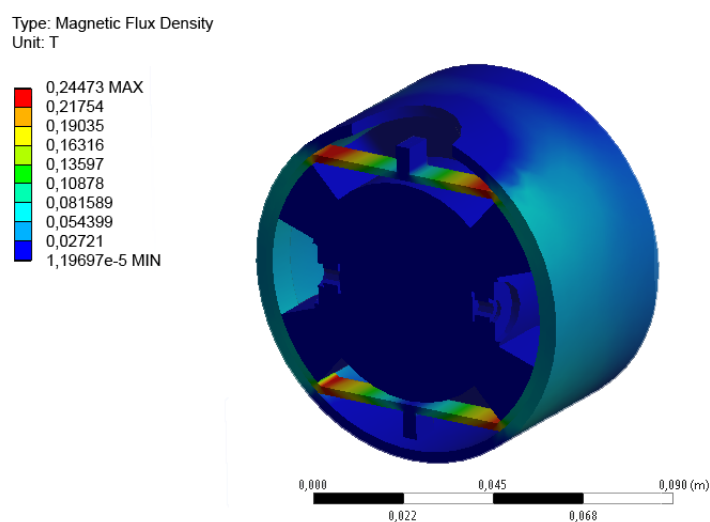


Obrázek 19: Graf závislosti magnetické indukce \mathbf{B} na spojnici z programu Ansys

Při návrhu tvaru budicí cívky byly vytvořeny varianty, které maximálně využívaly možný prostor. U sestav s výškou budicí cívky 11 mm byla zcela eliminována mezera mezi svorníkem a krytem. Varianta s mezerou mezi svorníkem je zobrazena na obr. 20. Varianta bez mezery mezi svorníkem a krytem je na obr. 21.



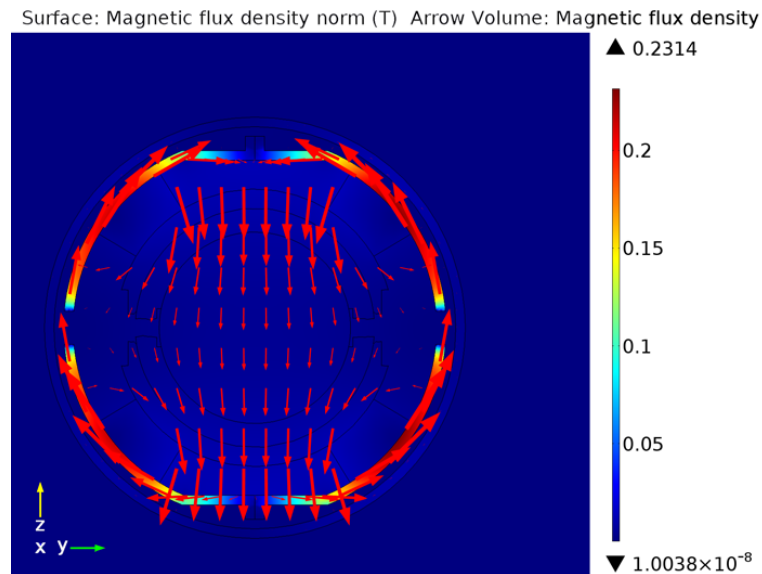
Obrázek 20: Varianta s mezerou – budicí cívka o šířce 76 mm s rozměry 9×20,8 mm (Ansys)



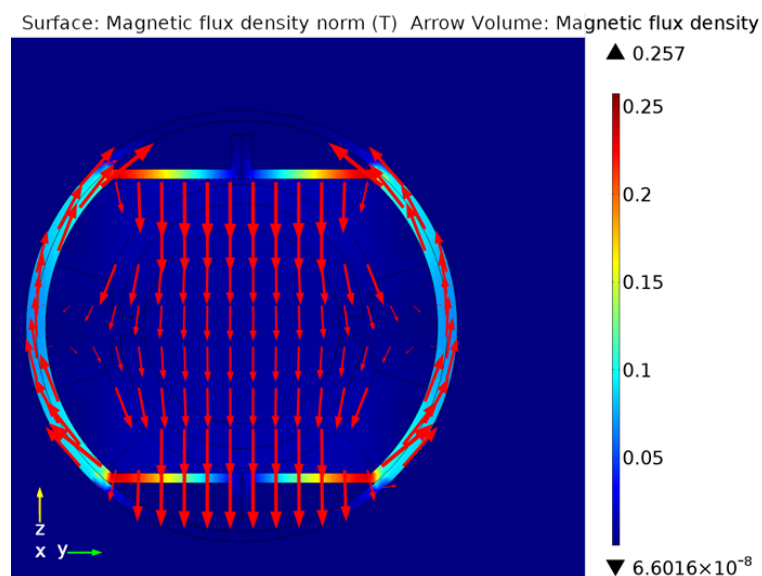
Obrázek 21: Varianta bez mezery – budicí cívka o šířce 76 mm s rozměry 11×17 mm (Ansys)

Na obr. 22 a obr. 23 je zobrazené vektorové rozložení magnetické indukce \mathbf{B} , kde jsou vektory vykresleny proporcionálně, tedy jejich velikost je závislá na velikosti magnetické indukce \mathbf{B} . Pro znázornění byla použita výchozí budicí cívka a varianta budicí cívky o podélné

šířce 76 mm, s rozměry průřezu vinutí 11×17 mm a s úhlem výseče vzduchové mezery 86° . Elektrody jsou umístěny v ose y a budicí cívky v ose z .



Obrázek 22: Vektorové rozložení magnetické indukce \mathbf{B} u výchozí geometrie cívky (Comsol Multiphysics)



Obrázek 23: Vektorové rozložení magnetické indukce \mathbf{B} u geometrie cívky s podélnou šířkou 76 mm, s rozměry průřezu vinutí 11×17 mm a s úhlem výseče 86° (Comsol Multiphysics)

7.3.2 Shrnutí vlivu tvaru budicích cívek na magnetické pole

Účelem simulací bylo prokázání vlivu mechanického provedení budicích cívek na magnetické pole. Do mechanických úprav tvaru budicích cívek byly zahrnuty rozměry průřezu vinutí, podélná šířka a úhel výseče vzduchové mezery budicí cívky. Podle výšky vinutí (9 mm a 11 mm) musel být použitý svorník o podélné šířce 16 mm upraven.

Pro porovnání jednotlivých variant budicích cívek bylo použito výsledné napětí U , které bylo průměrem z vypočtených hodnot programy Ansys a Comsol Multiphysics. Jak je patrné z tab. 1, vliv tvaru budicích cívek na magnetické pole byl prokázán. Výsledné magnetické pole je ovlivňováno dvěma hlavními faktory. Prvním faktorem je podélná šířka budicích cívek. Nejnižších hodnot bylo dosaženo u užších budicích cívek ($U_{9 \times 16-56mm} = 1,63 \text{ mV}$ a $U_{11 \times 13-56mm} = 1,64 \text{ mV}$). Vyšších hodnot napětí bylo dosaženo u širších budicích cívek ($U_{11 \times 17-76mm} = 1,985 \text{ mV}$ a $U_{9 \times 20-76mm} = 2,105 \text{ mV}$). Druhým faktorem byl úhel výseče vzduchové mezery. Při jejím zvětšení bylo dosaženo největšího napětí U u varianty 11×17 mm se šířkou 76 mm a úhlem výseče 86° $U_{11 \times 17-76mm-86^\circ} = 2,77 \text{ mV}$. Nárůst napětí byl 70 % vůči původní budicí cívce. Tato varianta geometrie budicí cívky byla použita k dalším simulacím.

Zvětšení úhlu výseče mělo největší vliv na výsledné napětí U . To může být zaprvé způsobeno tím, že výsledné magnetické pole je více homogenní než v předchozích případech. Právě při porovnání obr. 22 a obr. 23 vyplývá, že varianta budicí cívky s podélnou šířkou 76 mm, s rozměry průřezu vinutí 11×17 mm a s úhlem výseče vzduchové mezery 86° má znatelně homogennější magnetické pole než u varianty geometrie s výchozí budicí cívkou. Z druhé zvětšením úhlu výseče mohou svorníky dosedat blíže k vnější trubce, a tím eliminovat vzduchovou mezeru mezi svorníkem a vnější trubicí.

Z porovnání obr. 20 a obr. 21 je patrné, že magnetické pole by šlo uzavřít i pomocí krytu. Za předpokladu upevnění budicích cívek bez použití svorníků by mohl místo svorníku uzavřít magnetické pole kryt průtokoměru. Tento krok by mohl zmenšit počet částí, ze kterých je průtokoměr složen. Pro připevnění budicích cívek by bylo možné využít pólové nástavce, které by držely budicí cívky na konkrétním místě a zároveň by eliminovaly vnitřní vzduchovou mezeru budicích cívek.

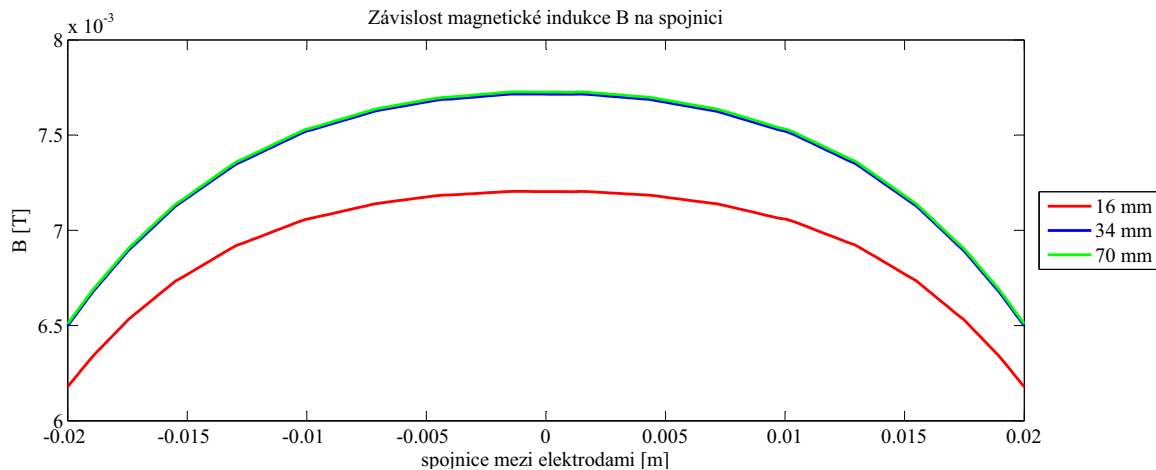
Při simulacích oba programy (Ansys a Comsol Multiphysics) dosahovaly velmi podobných i stejných vypočtených hodnot.

7.3.3 Vliv podélné šířky svorníků na magnetické pole

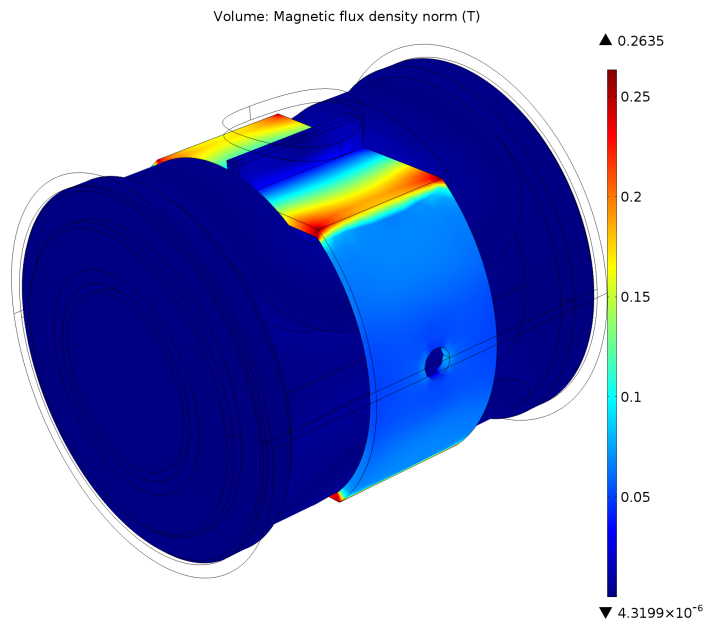
Pro studii vlivu svorníku na magnetické pole byla použita pouze jedna geometrie budicí cívky. Z předchozí kapitoly byla použita nejlepší geometrie budicí cívky s rozměry průřezu vinutí 11×17 mm, podélnou šířkou 70 mm a úhlem výseče 86° . V celé geometrii se měnily pouze varianty svorníků. Pro simulace byly připraveny tři varianty svorníků, které se od sebe odlišovaly pouze v podélné šířce. Výchozí geometrií pro svorníky byla varianta s podélnou šířkou 16 mm, která byla odvozena ze skutečného svorníku. Další dvě varianty byly modifikacemi výchozí geometrie a jejich podélné šířky byly 34 mm a 70 mm. Pro budicí cívku byly zadány hodnoty jako v předchozí kapitole, tedy počet závitů $N = 1100$ a budicí proud $I_B = 200$ mA. Výsledné hodnoty jsou zobrazeny v tab. 2.

Tabulka 2: Výsledné hodnoty modifikovaných svorníků ($N = 1100$ a $I_B = 200$ mA)

Typ svorníku	v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	$B \times D$ [$\text{mWb} \cdot \text{m}^{-1}$]		U [mV]	
		Ansys	Comsol	Ansys	Comsol
16 mm	10	0,276	0,278	2,76	2,78
34 mm	10	0,294	0,294	2,94	2,94
70 mm	10	0,294	0,296	2,94	2,96



Obrázek 24: Graf závislosti magnetické indukce B na spojnici s variantami svorníků z programu Comsol Multiphysics



Obrázek 25: Zobrazení magnetické indukce B [T] u budicí cívky s 11×17 mm, šířkou 76 mm a úhlem výseče 86° se svorníkem o šířce 34 mm a potlačeným krytem (Comsol Multiphysics)

7.3.4 Shrnutí vlivu podélné šířky svorníků na magnetické pole

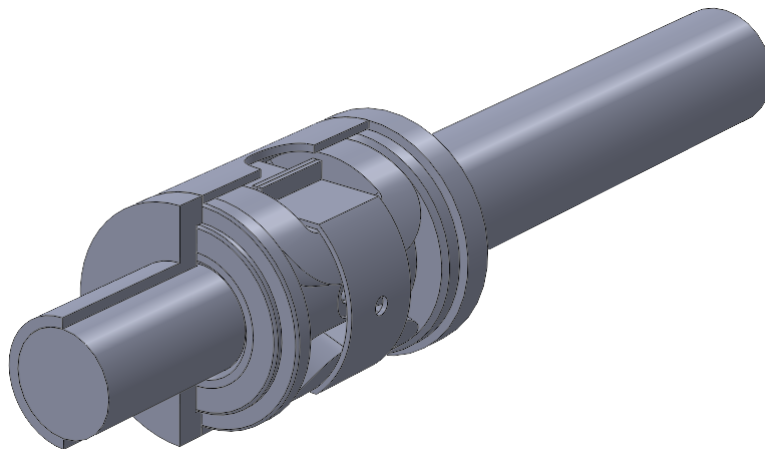
Vliv podélné šířky svorníků se určoval podle výsledného napětí U mezi elektrodami. Vypočetl se jako průměrná hodnota z obou vypočtených hodnot z programů Ansys a Comsol Multiphysics. Podle zobrazených výsledků v tab. 2 je patrné, že nejnižší hodnoty napětí $U_{16mm} = 2,77 \text{ mV}$ bylo dosaženo u sestavy průtokoměru s výchozí geometrií svorníku. Zbylé dvě geometrie svorníků se od sebe lišily v napětí o 0,01 mV. U varianty s podélnou šířkou 34 mm se vypočtené napětí zvedlo o 6 % oproti původní variantě. Jeho hodnota byla $U_{34mm} = 2,94 \text{ mV}$, což bylo druhé největší vypočtené napětí. Největšího napětí $U_{70mm} = 2,95 \text{ mV}$ bylo dosaženo u varianty svorníku s podélnou šířkou 70 mm. Mezi svorníky o šířce 34 mm a 70 mm nebyl významný rozdíl, a proto byl pro výrobu funkčního modelu vybrán svorník o šířce 34 mm.

7.4 Vliv laminárního a turbulentního proudění na výsledné napětí mezi elektrodami

Pro simulace byla použita varianta průtokoměru 11×17 mm s podélnou šířkou 76 mm, úhlem výseče 86° a se svorníkem o šířce 34 mm. U budicích cívek bylo zachováno stejné nastavení ($N = 1100$ a $I_B = 200$ mA) jako v předchozích kapitolách.

Pro zjištění kritické rychlosti proudění tekutiny byl použit vzorec 1.15. Při dosazení hodnoty 2320 za Reynoldsovo číslo byla vypočtena kritická rychlost $v_{krit} = 0,058$ m·s⁻¹. Proto simulace pro laminární proudění byla provedena pro rychlost $v_{Lam} = 0,01$ m·s⁻¹. Pro turbulentní proudění byly použity rychlosti $v_{T1} = 0,86$ m·s⁻¹ a $v_{T2} = 10$ m·s⁻¹.

Pro Comsol Multiphysics byla připravena geometrie kompletního zapojení průtokoměru, která je zobrazena na obr. 26. Pro Fluent byla použita pouze geometrie vody. Pro eliminaci chyb zanesených do simulace pomocí okrajových podmínek musel být začátek trubky vzdálen $3 \times DN$ od měřené spojnice. Konec trubky byl ve vzdálenosti $7 \times DN$ od měřené spojnice mezi elektrodami. Celková vzdálenost geometrie vody byla 400 mm.



Obrázek 26: Kompletní zapojení průtokoměru pro program Comsol Multiphysics

7.5 Shrnutí vlivu laminárního proudění

Simulace proudění byly vypočteny pro rychlost $v_{Lam} = 0,01$ m·s⁻¹. V tab. 3 jsou zobrazena výsledná napětí U , která se od sebe liší ve způsobu vypočtení. Pro napětí $U_{Bez\ profilu}$

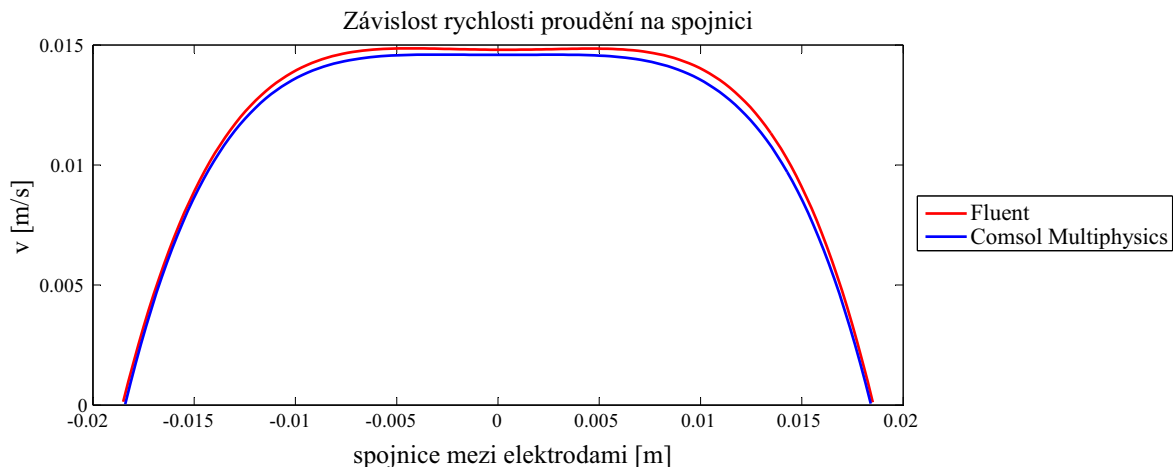
byla magnetická indukce \mathbf{B} vynásobena konstantní hodnotou rychlosti. Oproti tomu u napětí $U_{S\ profilem}$ byl do výpočtu zahrnut rychlostní profil proudění.

Tabulka 3: Výsledná napětí U při laminárním proudění

Program	v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	$U_{Bez\ profilu}$ [μV]	$U_{S\ profilem}$ [μV]
Ansys – Fluent	0,01	2,94	3,37
Comsol Multiphysics	0,01	2,94	3,19

V programu Ansys – Fluent bylo vypočtené napětí bez rychlostního profilu proudění $U_{Bez\ profilu} = 2,94\ \mu\text{V}$, ale u napětí vypočteného pomocí rychlostního profilu proudění bylo zvýšení o 14,6 %. Napětí vypočtené bez rychlostního profilu v programu Comsol Multiphysics bylo $U_{Bez\ profilu} = 2,94\ \mu\text{V}$ a i v tomto případě napětí vypočtené pomocí rychlostního profilu bylo větší o 8,5 %. Po porovnání výsledků vyplývá, že při rychlosti $v_{Lam} = 0,01\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ je značný rozdíl mezi vypočtením napětí s rychlostním profilem nebo bez něj. Proto při přesném výpočtu napětí je nutné při laminárním proudění zahrnout do výpočtu rychlostní profil proudění.

Na obr. 27 jsou zobrazeny rychlostní profily proudění z programů Ansys – Fluent a Comsol Multiphysics. Je patrné, že oba profily se od sebe příliš neodlišují stejně jako u výsledných napětí vypočtených pomocí profilu proudění.



Obrázek 27: Laminární profil proudění na spojnici mezi elektrodami

7.6 Shrnutí vlivu turbulentního proudění

Pro shrnutí vlivu turbulentního proudění byly pro simulace připraveny dvě rychlosti. První rychlost byla $v_{T1} = 0,86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, která byla největší dosaženou rychlostí na průtokoměrné lince. Naproti tomu druhá rychlost $v_{T2} = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ byla maximální certifikovanou rychlostí průtokoměru.

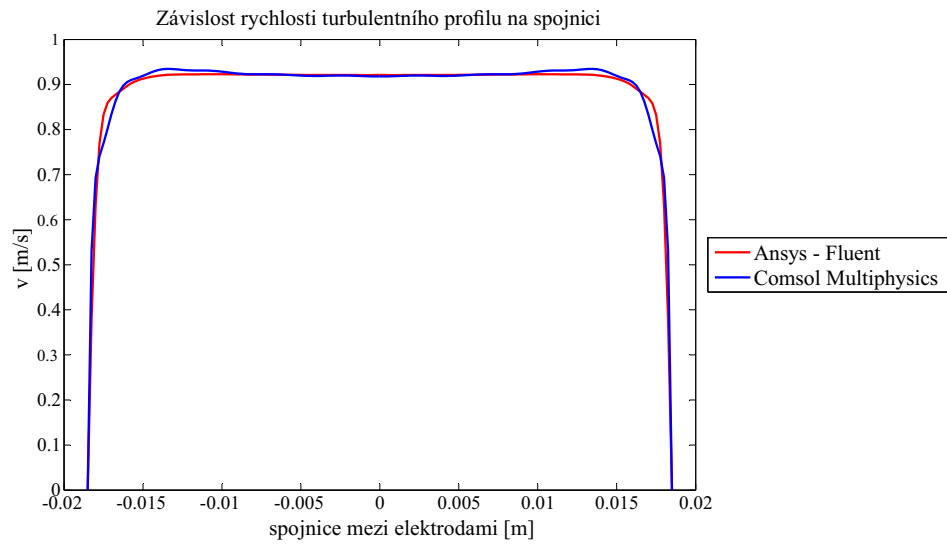
V tab. 4 jsou zobrazena vypočtená napětí U mezi elektrodami. Výsledné napětí $U_{Bez\ profilu}$ bylo vypočteno pomocí konstantní rychlosti. Oproti tomu napětí $U_{S\ profilem}$ bylo vypočteno pomocí profilu turbulentního proudění.

Tabulka 4: Výsledná napětí U při turbulentním proudění

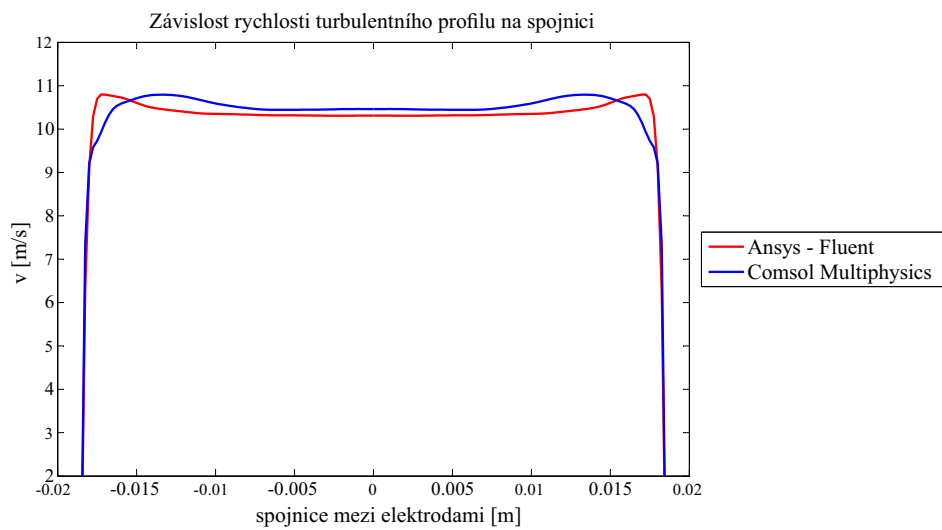
$\mathbf{v} \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}]$	$\mathbf{U}_{Bez\ profilu} \text{ [mV]}$		$\mathbf{U}_{S\ profilem} \text{ [mV]}$	
	Ansysis	Comsol	Ansysis	Comsol
0,86	0,253	0,253	0,245	0,249
10	2,940	2,940	2,800	2,882

Při rychlosti $v_{T1} = 0,86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se výsledné napětí vypočtené pomocí rychlostního profilu zmenšilo v obou programem. U programu Ansysis – Fluent to byl pokles o 3,2 % a u programu Comsol Multiphysics to bylo o 1,6 %. Ve druhém případě se při rychlosti $v_{T2} = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ výsledné napětí vypočtené s rychlostním profilem zmenšilo oproti napětí vypočtenému bez rychlostního profilu. U programu Ansysis – Fluent to bylo o 4,8 % a u programu Comsol Multiphysics činil rozdíl 2 %. Pro přesné vypočtení napětí U mezi elektrodami musí být rychlostní profil zahrnut do výpočtu, protože opakovatelná chyba měření elektromagnetických průtokoměrů se pohybuje do 0,5 %.

Profily proudění jsou zobrazeny na obr. 28 a obr. 29.

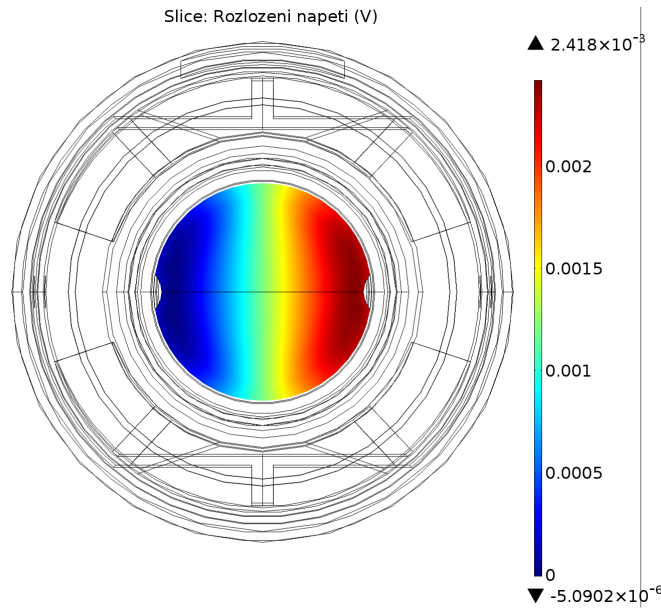


Obrázek 28: Turbulentní profil proudění na spojnici mezi elektrodami při $v = 0,86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Obrázek 29: Turbulentní profil proudění na spojnici mezi elektrodami při $v = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Na obr. 30 je zobrazeno rozložení napětí mezi elektrodami při rychlosti $v = 0,86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

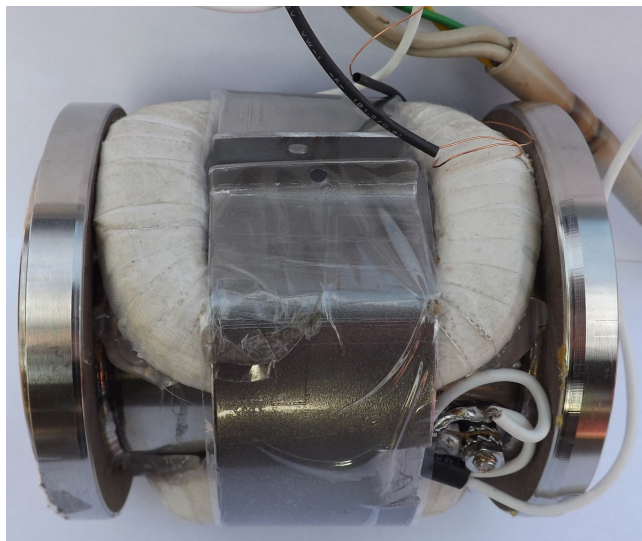


Obrázek 30: Rozložení napětí U mezi elektrodami při rychlosti $v = 0,86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ z programu Comsol Multiphysics

8 Experimentální měření

Provedené simulace v předchozí kapitole poskytly informace k vyrobení funkčního modelu (zkráceně FM) elektromagnetického průtokoměru. Pro FM průtokoměru byla zvolena budicí cívka s rozměry průřezu 9×17 mm, s podélnou šířkou 76 mm a úhlem výseče vzduchové mezery 86° , která se nechala vyrobit u firmy SVED. Její technický výkres je v příloze C. Pro svorník byla vybrána varianta s podélnou šířkou 34 mm. Podle simulace svorníku byla na výrobu použita konstrukční ocel. Pro porovnání materiálů použitých na svorník byl ještě vyroben svorník z transformátorového plechu.

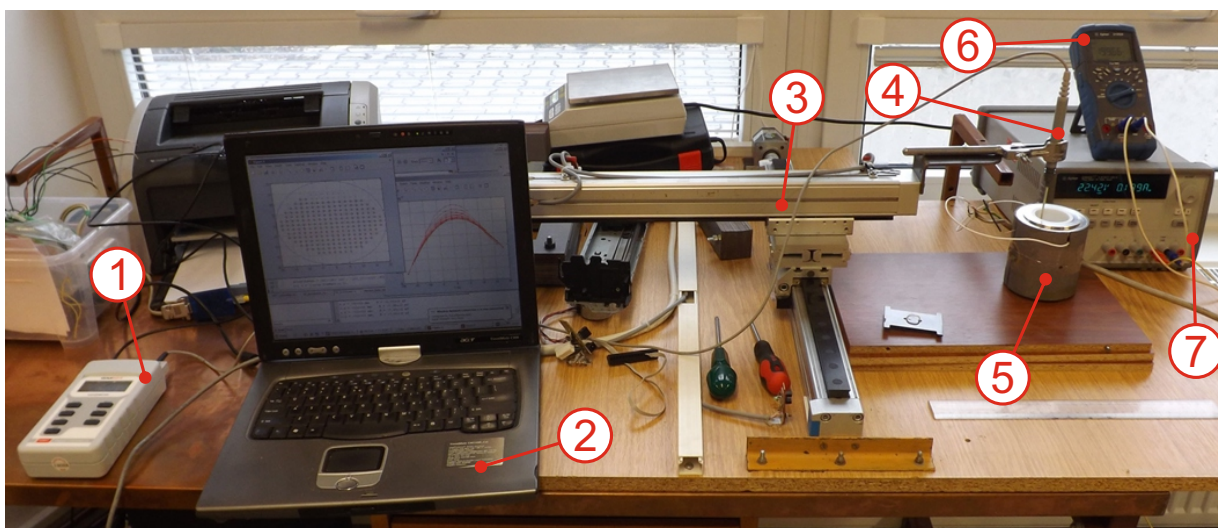
Z důvodu ověření vypočtených hodnot ze simulací byl FM průtokoměru (obr. 31) nejprve proměřen pomocí Hallovy sondy a následně byl porovnán s výchozí variantou elektromagnetického průtokoměru (příloha D). Výsledky z experimentálního měření jsou sepsány v následujících kapitolách.



Obrázek 31: Vyrobený funkční model elektromagnetického průtokoměru

8.1 Porovnání naměřených hodnot s hodnotami ze simulací

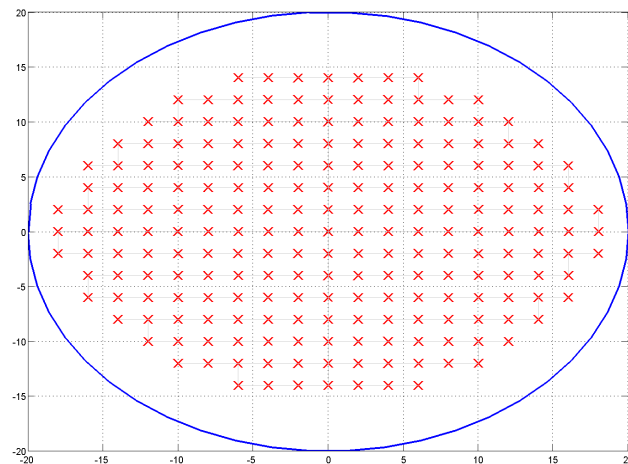
Pro ověření rozložení magnetického pole ze simulací bylo nutné odměřit reálné průtokoměry. Měření bylo provedeno na Technické univerzitě v Liberci (TUL) v budově A, kde byl v laboratořích EL1 použit pracovní stůl s polohovacím zařízením (obr.32).



Obrázek 32: Pracovní stůl s polohovacím zařízením: 1) Hirst Gaussmeter GM08, 2) pracovní notebook, 3) polohovací zařízení, 4) 1D Hallova sonda, 5) měřený průtokoměr, 6) multimetr Agilent U1252A, 7) stejnosměrný zdroj Agilent E3631A

K vybavení pracovního stolu patřil notebook, který sloužil k ovládání polohovacího zařízení a sběru dat. Pro měření magnetické indukce B byl použit měřič magnetického pole Hirst typ Gaussmeter GM08, přičemž 1D Hallova sonda byla připevněna na polohovací zařízení. Pro sběr naměřených hodnot byl notebook propojen s Gaussmetrem pomocí USB. Napájení budících cívek bylo zajištěno pomocí stejnosměrného zdroje Agilent E3631A. Pro kontrolu budícího proudu I_B byl sériově připojen multimetr Agilent U1252A ve funkci ampérmetru.

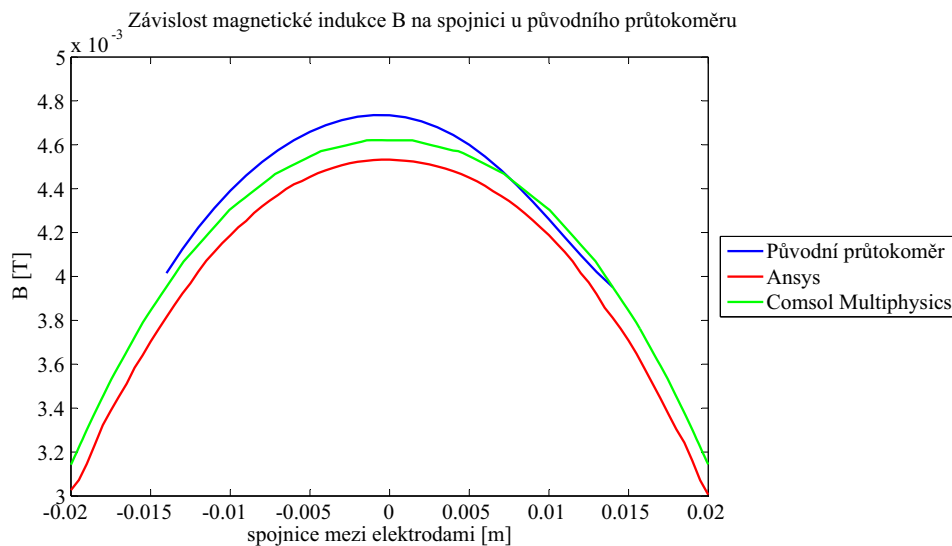
Nejprve byl v programu Matlab vytvořen rastr, který je zobrazen na obr. 33. Dále byla Hallova sonda umístěna do středu průtokoměru ve výšce elektrod. Při měření se Hallova sonda pohybovala podle bodů vytvořených v rastru (obr. 33). Pro odstranění parazitních složek probíhalo měření nadvakrát, kdy při druhém měření byla změněna polarita budícího proudu $I_B = 200 \text{ mA}$. Naměřená data byla zpracována v programu Matlab.



Obrázek 33: Rozložení měřicích bodů v rovině elektrod průtokoměru DN40

8.1.1 Porovnání původního průtokoměru se simulacemi

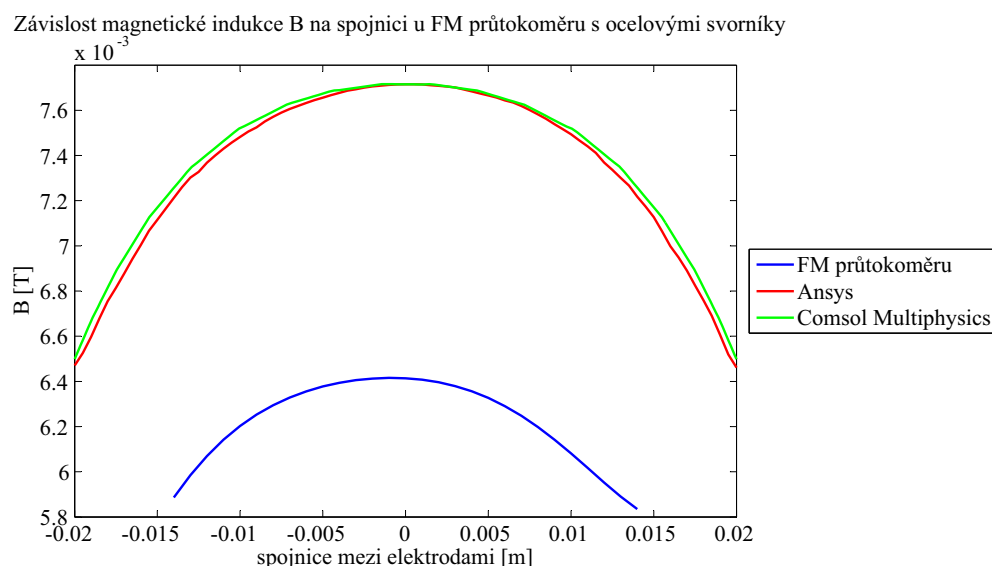
Nejprve byla naměřená data použita pro porovnání simulací s reálnými čidly. Pro první srovnání byl vybrán původní průtokoměr. Výsledný graf závislosti magnetické indukce B na poloze mezi elektrodami je zobrazen na obr. 34.

Obrázek 34: Graf závislosti magnetické indukce B na spojnici mezi elektrodami při porovnání simulací s původním průtokoměrem

Jak je patrné z obr. 34, tak rozdíl mezi křivkami není příliš značný. Rozdíl největší hodnoty magnetické indukce \mathbf{B} u původního průtokoměru (4,735 mT) a největší hodnoty ze simulace z programu Ansys je 0,203 mT, který tvoří pokles o 4,3 % oproti původnímu průtokoměru. Rozdíl největších hodnot mezi původním průtokoměrem (reálným měřením) a simulací z programu Cmsol Multiphysics je 0,114 mT. Vůči původnímu průtokoměru je to pokles největší hodnoty o 2,4 %. Pro reálné měření byly zachovány stejné parametry jako u simulací, tedy konkrétně budicí proud se rovnal $I_B = 200 \text{ mA}$ a počet závitů byl 1100.

8.1.2 Porovnání funkčního modelu průtokoměru se simulacemi

U proměřeného funkčního modelu průtokoměru byly použity svorníky z konstrukční oceli. Výsledné porovnání křivek funkčního modelu a simulací je zobrazeno na obr. 35.



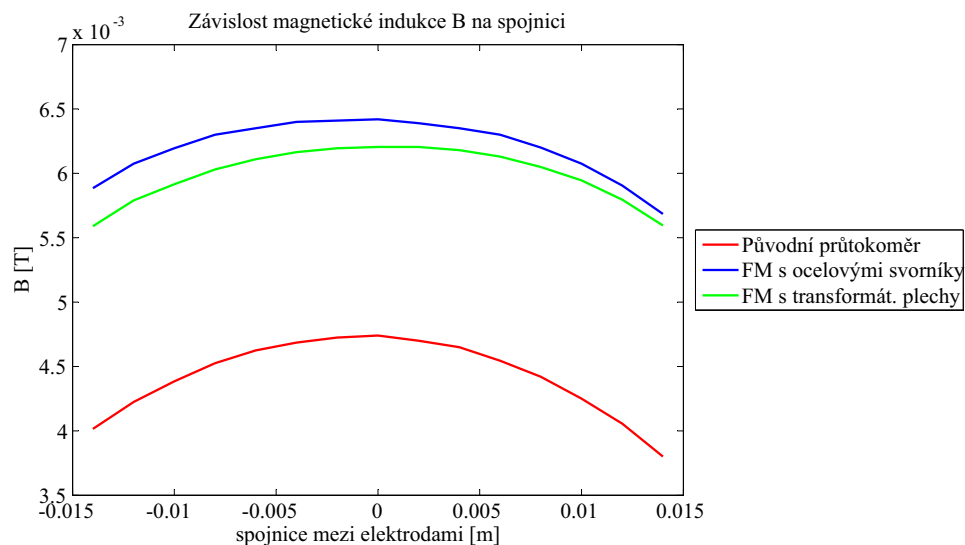
Obrázek 35: Graf závislosti magnetické indukce \mathbf{B} na spojnici mezi elektrodami při porovnání simulací s FM průtokoměrem

Křivky ze simulací jsou značně odlišné od reálného měření. U simulací je maximální hodnota magnetické indukce \mathbf{B} totožná, ale rozdíl mezi globálními maximy simulací a měřeného funkčního modelu průtokoměru činí 1,301 mT. Oproti předpokládané maximální hodnotě magnetické indukce \mathbf{B} je to pokles o 17 %, tedy na hodnotu 6,416 mT. Výsledný rozdíl oproti simulacím byl způsoben zvětšením mezery mezi svorníky a vnější trubkou průtoko-

měru, ale také zvětšením rozestupu mezi čely u svorníků. Tato čela svorníků v geometrii průtokoměru se navzájem dotýkala.

8.1.3 Porovnání funkčního modelu s původním průtokoměrem

Pro vyhodnocení změn provedených v simulacích byl funkční model porovnán s původním průtokoměrem. Do porovnání byla ještě přidána varianta průtokoměru, kde byly vyměněny svorníky u funkčního modelu za svorník z transformátorového plechu.

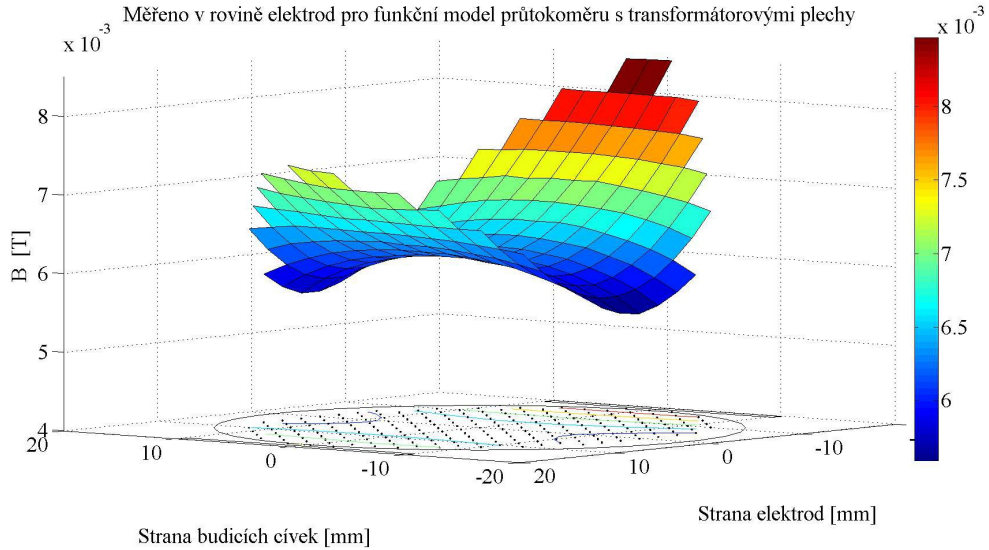


Obrázek 36: Graf závislosti magnetické indukce B na spojnici mezi elektrodami při porovnání původního průtokoměru s FM průtokoměru s ocelovými svorníky a se svorníky z transformátorového plechu

Z obr. 36 vyplývá, že největší hodnoty magnetické indukce B bylo dosaženo u varianty FM s ocelovými svorníky (6,416 mT). Nárůst největší hodnoty magnetické indukce B oproti původnímu průtokoměru je 35 %. Přesně se hodnota zvětšila o 1,65 mT. U funkčního modelu s transformátorovými plechy činil nárůst magnetické indukce 31 %.

Naměřená data dávají informaci o rozložení magnetické indukce B v celé rovině a ne pouze jenom na spojnici mezi elektrodami. Pro přehlednější znázornění naměřených dat je lze zobrazit ve třírozměrném prostoru. Právě toto zobrazení je na obr. 37, kde je patrný značný rozdíl maximálních hodnot magnetické indukce B u přední a zadní budicí cívky. Tato nesymetrie rozložení magnetické indukce B je způsobena zvětšením vzdálenosti mezi vnější

trubkou a svorníkem z transformátorového plechu u jedné z budících cívek. Nesymetrické rozložení magnetického pole ještě může být příčinou dosažení menších hodnot než tomu je u FM s ocelovými svorníky. Ostatní obrázky rozloženého magnetického pole jsou v příloze E.

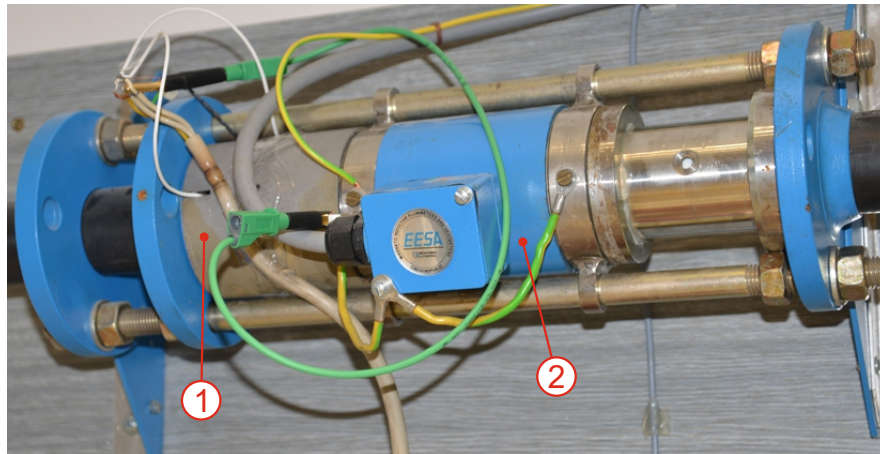


Obrázek 37: Zobrazení rozložení magnetické indukce B v rovině elektrod u FM s transformátorovými plechy

8.2 Měření na průtokoměrné lince

Z předchozí kapitoly je patrné, že u funkčního modelu průtokoměru byla zvýšena jeho citlivost oproti původnímu průtokoměru. Pro ověření reálného chování funkčního modelu průtokoměru v praxi bylo připraveno měření na průtokoměrné lince. Pro měření byla využita průtokoměrná linka na TUL v budově A v místnosti TK8. Průtokoměrná linka je zobrazena na obr. 38, kde je označen jak funkční model, tak i původní průtokoměr.

Jelikož je průtokoměrná linka používána pro laboratorní úlohy, nemusel být původní průtokoměr nijak upravován. Pro funkční model byla použita řídicí jednotka od stejného výrobce jako u původního průtokoměru. Obě řídicí jednotky se lišily pouze v nastavení offset napětí, proto naměřené hodnoty napětí U nezačínají na stejné hodnotě.



Obrázek 38: Průtokoměrná linka v místnosti TK8: 1) funkční model průtokoměru, 2) původní průtokoměr

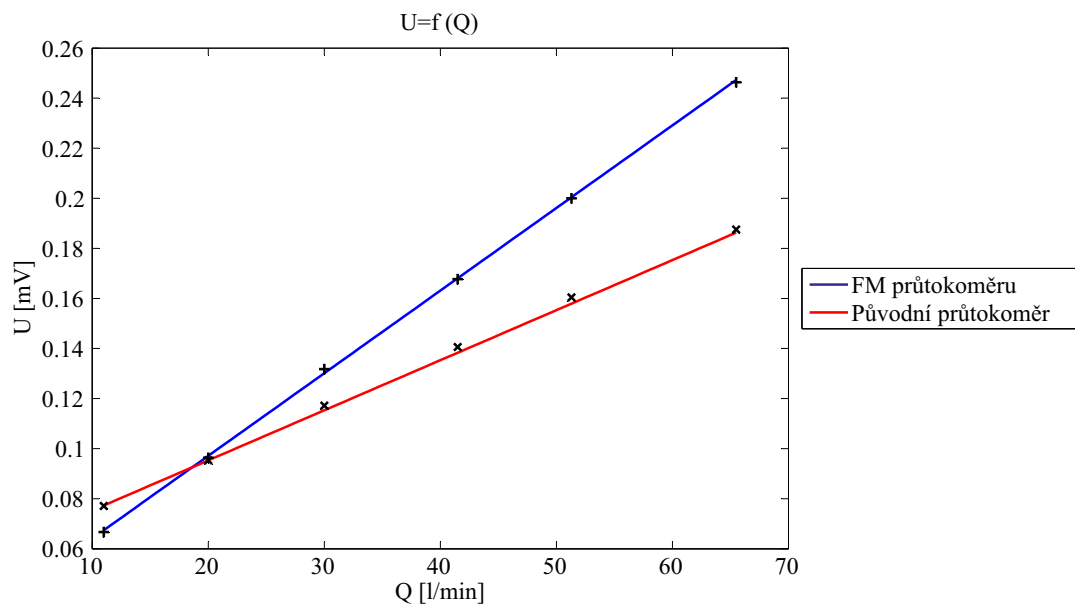
Při experimentálním měření byly z řídicích jednotek odečteny hodnoty zesíleného napětí U mezi elektrodami. K dosažení původních (nezesílených) hodnot napětí bylo potřeba naměřené hodnoty vydělit zesílením $K = 1920$. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tab. 5.

Tabulka 5: Naměřené hodnoty na průtokoměrné lince

Q [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$]	v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	U_{FM} [mV]	$U_{Původní}$ [mV]	$\frac{U_{FM}}{K}$ [mV]	$\frac{U_{Původní}}{K}$ [mV]
11	0,15	128	148	0,067	0,077
20	0,27	185	183	0,096	0,095
30	0,39	253	228	0,131	0,119
41,5	0,55	322	270	0,168	0,141
51,3	0,68	384	308	0,200	0,160
65,5	0,86	473	362	0,246	0,188

Při porovnání nezesíleného napětí u funkčního modelu s hodnotami napětí při turbulentním proudění (kap. 7.6) vyplývá, že odměřené hodnotě jsou blíže napětí vypočtená pomocí rychlostního profilu než napětí, která byla vypočtena bez něj.

Pro zobrazení grafu se použily hodnoty objemového průtoku Q a nezesílené napětí U . Výsledný graf je zobrazen na obr. 39, kde je jasně zřetelný rozdíl ve strmosti přímky mezi funkčním modelem a původním průtokoměrem.



Obrázek 39: Graf porovnání citlivosti průtokoměrů

Pomocí lineární regrese byla zjištěna rovnice přímky původního průtokoměru

$$y = 0.002x + 0.0553. \quad (8.1)$$

Oproti tomu rovnice přímky pro funkční model se liší značně ve směrnici.

$$y = 0.0033x + 0.0311 \quad (8.2)$$

U směrnice u funkčního modelu došlo k nárůstu o 65% oproti původnímu průtokoměru. Tímto měřením bylo prokázáno, že provedené změny průtokoměru měly vliv na zvýšení citlivosti průtokoměru.

9 Shrnutí

Do shrnutí byla zahrnuta nejen kapitola zhodnocení výsledků, ale také kapitola věnovaná porovnání simulačních programů. V kapitole zhodnocení výsledků byly porovnány jednotlivé geometrie ze simulací, ale i naměřených dat z experimentálního měření. Při porovnávání programů byla hodnocena nejen přesnost u konkrétních geometrií, ale také uživatelské rozhraní.

9.1 Zhodnocení výsledků

Náplní diplomové práce bylo vytvoření CAD modelů elektromagnetických průtokoměrů pro následnou simulaci v programech Ansys a Comsol Multiphysics. Vypočtené výsledky byly ověřeny reálným měřením.

Pro vytvoření výchozího CAD modelu se využil reálný elektromagnetický průtokoměr. V první fázi simulací se řešil pouze vliv tvarových změn na budicí cívky, kde se varianty hodnotily podle výsledného napětí mezi elektrodami. Původní budicí cívka měla podélnou šířku 56 mm a průřez vinutí o stranách 9×16 mm. Pro simulace bylo vytvořeno pět modelů (čtyři modifikované budicí cívky a jeden výchozí model). Oba programy dosáhly maximální hodnoty napětí mezi elektrodami u stejného modelu. Konkrétně pro model s průřezem cívky 11×17 mm s podélnou šířkou 76 mm, kde byl zvětšen úhel výseče vzduchové mezery na 86° . Výsledné napětí mezi elektrodami vyšlo v programu Ansys $U_{Ansys} = 2,76$ mV. Vypočtené napětí v programu Comsol Multiphysics bylo větší o 0,73 %, tedy konkrétně bylo napětí $U_{Comsol} = 2,78$ mV. Výsledná napětí byla vypočtena při rychlosti proudění $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Ve druhé fázi simulací byly měněny pouze svorníky u budicích cívek. Pro simulace byla použita nejlepší varianta budicí cívky uvedená v předešlém odstavci. Celkově byly vytvořeny tři varianty svorníků. První varianta svorníku byla odvozena z reálného svorníku a měla podélnou šířku 16 mm. Další dvě varianty byly jejími modifikace a lišily se pouze v podélné šířce svorníku (34 mm a 70 mm). Největšího napětí bylo dosaženo u varianty svorníku s podélnou šířkou 70 mm ($U_{Ansys} = 2,96$ mV a $U_{Comsol} = 2,94$ mV). Druhého největšího napětí bylo dosaženo u varianty svorníku s podélnou šířkou 34 mm. Rozdíl napětí mezi druhou a třetí variantou činil v programu Ansys 0,7 % ($U_{Ansys} = 2,94$ mV) a v programu Comsol Multiphysics bylo dosaženo stejných hodnot napětí $U_{Comsol} = 2,94$ mV. Proto byla pro výrobu vybrána varianta svorníku o podélné šířce 34 mm.

Poslední fází simulací bylo porovnání vlivu proudění na výsledné napětí mezi elektrodami. Pro simulace byla použita geometrie určená k vytvoření funkčního modelu průtokoměru. Nejprve bylo řešeno laminární proudění při rychlosti $v = 0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Byla porovnána napětí, která byla vypočtena pomocí rychlostního profilu a bez rychlostního profilu. U výsledných napětí vypočtených pomocí rychlostního profilu byl nárůst napětí oproti napětím vypočteným bez rychlostního profilu proudění. U programu Ansys – Fluent byl tento nárůst 14,6 %, tedy konkrétně výsledné napětí bylo $U_{Ansys\ S} = 3,37 \mu\text{V}$. Menšího nárůstu napětí bylo dosaženo u programu Comsol Multiphysics. Výsledný nárůst napětí byl 8,5 % ($U_{Comsol\ S} = 3,19 \mu\text{V}$). Při vypočtení napětí mezi elektrodami při laminárním proudění nelze rychlostní profil zanedbat.

Simulace turbulentního proudění byly řešeny pro rychlosti $v_{T1} = 0,86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $v_{T2} = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. U obou rychlostí došlo při vypočtení napětí pomocí rychlostních profilů ke zmenšení výsledných napětí oproti vypočtenému napětí bez rychlostního profilu. Při rychlosti $v_{T1} = 0,86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ byl pokles napětí u programu Ansys – Fluent 3,2 %. Menší pokles byl u programu Comsol Multiphysics a činil 1,6 %. Konkrétně u programu Ansys – Fluent se výsledné napětí zmenšilo na hodnotu $U_{Ansys\ S} = 0,245 \mu\text{V}$ a u programu Comsol Multiphysics na napětí $U_{Comsol\ S} = 0,294 \text{ mV}$. Při rychlosti $v_{T2} = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se pokles napětí ještě zvětšil. U programu Ansys – Fluent se napětí vypočtené pomocí rychlostního profilu zmenšilo na $U_{Ansys\ S} = 2,8 \text{ mV}$, což byl pokles o 4,8 %. Pokles napětí na hodnotu $U_{Comsol\ S} = 2,882 \text{ mV}$ bylo u programu Comsol Multiphysics. Napětí se zmenšilo o 2 %. Pro přesný výpočet napětí U nelze zanedbat rychlostní profil proudění, protože opakovatelná chyba elektromagnetických průtokoměrů je do 0,5 %.

Podle geometrie budící cívky (podélná šířka 76 mm, rozměry průřezu 11×17 mm a úhel výseče 86°) se svorníkem o šířce 34 mm byl vytvořen funkční model průtokoměru. Při experimentálním měření byly nejprve porovnány simulace s původním průtokoměrem. Vypočtené hodnoty největších hodnot magnetické indukce \mathbf{B} byly menší než u změřeného původního průtokoměru. Maximální hodnota magnetické indukce \mathbf{B} byla u původního průtokoměru 4,735 mT. Program Ansys vypočetl menší hodnotu o 4,3 %. Také Comsol Multiphysics vypočetl hodnotu menší o 2,4 %. Chyba obou programů byla do 5 %, a proto lze simulace označit jako velmi přesné.

Při porovnání funkčního modelu a simulací byl značný rozdíl. Simulace z programu Ansys

a Comsol Multiphysics vypočetly stejnou maximální hodnotu magnetické indukce \mathbf{B} . Při proměření funkčního modelu byla maximální hodnota magnetické indukce \mathbf{B} menší o 17 %. Rozdíl byl způsoben nepřesným vyrobením svorníku podle geometrie ze simulací.

Nakonec byl porovnán původní průtokoměr s funkčním modelem s ocelovými svorníky a funkčním modelem s transformátorovým plechem. Maximální hodnota magnetické indukce u původního průtokoměru byla 4,735 mT. U funkčního modelu s transformátorovým plechem bylo zvětšení magnetické indukce \mathbf{B} o 31 %. Největšího zlepšení bylo u funkčního modelu s ocelovými svorníky, kde byla maximální hodnota magnetické indukce \mathbf{B} zvětšena o 35 %.

Závěrečné měření bylo provedeno na průtokoměrné lince. Při měření byla postupně zvyšována rychlost proudění kapaliny. Při porovnání hodnot výsledného napětí mezi elektrodami u funkčního modelu při rychlosti $0,86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ vyšlo, že vypočtená napětí pomocí rychlostního profilu jsou blíže k reálnému měření, než napětí vypočtená bez rychlostního profilu proudění. Při zobrazení naměřených hodnot u funkčního modelu a původního průtokoměru vyplývá, že přímka u funkčního modelu je strmější než u původního průtokoměru. Při porovnání směrnic u rovnic přímek je patrné, že funkční model průtokoměru je o 65 % citlivější než původní průtokoměr. Pomocí mechanických úprav bylo vytvořeno silnější a homogennější magnetické pole, než tomu je u původního průtokoměru.

9.2 Porovnání programů Ansys a Comsol Multiphysics

Pro zhodnocení přesnosti programů Ansys a Comsol Multiphysics byly hodnoty ze simulací porovnány s experimentálním měřením. V experimentálním měření byly proměřeny tři varianty průtokoměrů (původní průtokoměr, FM s ocelovými svorníky a FM s transformátorovým plechem). Pro následné porovnání byly použity varianty původního průtokoměru a funkčního modelu s ocelovými svorníky.

V simulacích jsou tyto varianty označeny jako geometrie původního průtokoměru a geometrie budící cívky s podélnou šířkou 76 mm, s rozměry průřezu $11 \times 17 \text{ mm}$ a úhlem výseče vzduchové mezery 86° se svorníkem o podélné šířce 34 mm. U varianty původního průtokoměru bylo dosaženo větší maximální hodnoty magnetické indukce \mathbf{B} , než bylo vypočteno v simulacích. U programu Comsol Multiphysics činil tento rozdíl 2,4 %, oproti tomu v programu Ansys byl rozdíl ještě o 1,9 % větší. Konkrétně byla hodnota o 4,3 % menší v simulaci

než v experimentálním měření. Při porovnání druhé varianty průtokoměru (FM s ocelovými svorníky) dosahovaly oba programy stejné maximální hodnoty magnetické indukce \mathbf{B} . Rozdíl maximálních hodnot magnetické indukce \mathbf{B} ze simulací a experimentálním měřením byl 17 %.

Oba programy prokázaly výbornou přesnost, i když ve druhém případě byl rozdíl 17%. Rozdíl byl způsoben z hlavní části kvůli nepřesnému mechanickému provedení svorníku oproti virtuální geometrii svorníku. Po shrnutí těchto dvou porovnání vychází, že v tomto případě je přesnějším programem Comsol Multiphysics.

Pro simulace bylo používáno prostředí Ansys Workbench, které je zobrazeno na obr. 10. Program Comsol Multiphysics má pouze jedno uživatelské rozhraní, které používá od verze 4.0. Uživatelské rozhraní programu Comsol Multiphysics bylo přehlednější a celistvější. Při nastavování simulací průtokoměru uživatel zůstával v jednom okně. Naproti tomu v programu Ansys Workbench uživatel procházel při nastavování simulací v systému Magnetostatic mezi dvěma okny. Při změně projektu v předešlém okně musely být aktualizována data pomocí tlačítka Update Project, nebo program nabídl přijetí aktualizovaných dat. Ansys přibral do svých systémů Fluent a CFX, které měly zcela odlišné uživatelské rozhraní oproti systému Magnetostatic.

Při samotném zadávání budících cívek program Ansys využívá jednoduchého nastavení, které používá již delší dobu. Naproti tomu v programu Comsol Multiphysics teprve od verze 4.3a zjednodušili nastavení budících cívek, které je obdobné jako v programu Ansys. Při výběru konkrétních prvků, ploch nebo hran v programu Comsol Multiphysics byla užitečná možnost potvrzení výběru pravým tlačítkem u myši. V programu Ansys se tento výběr potvrzoval až v bočním menu pomocí tlačítka Apply.

Porovnání rychlosti výpočtu u obou programů by se mohlo provést pomocí zasítování geometrie v externím programu. Oba programy by měly stejné podmínky výpočtu, ale již při síťování si programy optimalizují síť pro zrychlení výpočtu. Proto by se musely porovnat časy při výpočtu externí zasítované geometrie a geometrie, která byla zasítovaná pomocí interních funkcí programu.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo zlepšení citlivosti elektromagnetického průtokoměru. Pro zhodnocení vlivu mechanických úprav budicích cívek a svorníků byly použity simulační programy Ansys a Comsol Multiphysics. Podle nejvhodnější geometrie byl vyroben funkční model průtokoměru, který byl následně experimentálně proměřen.

Z důvodu zpřesnění simulací bylo nejprve nutné vytvořit CAD model (dále jen geometrie) elektromagnetického průtokoměru. Pro vytvoření geometrií byl použit program SolidWorks. Výchozí geometrie průtokoměru byla vytvořena podle původního čidla od firmy LIMESA meters s.r.o.

Celkově bylo v každém simulačním programu provedeno deset simulací. Nejprve byl řešen v simulacích vliv mechanických úprav budicích cívek. Pro další simulace byla vybrána nejlepší varianta budicí cívky. Následně byl řešen vliv podélné šířky svorníků. Podle simulací byl k výrobě zvolen svorník o podélné šířce 34 mm, který byl širší než původní svorník. Vypočtené hodnoty z programů Ansys a Comsol Multiphysics se od sebe lišily maximálně o 5 %.

V experimentálním měření magnetických polí byl nejprve porovnán původní průtokoměr se simulacemi. Naměřená data původního průtokoměru byla větší o 4,3 % než vypočtené hodnoty z programu Ansys a o 2,4 % u programu Comsol Multiphysics. Podle nejvhodnější geometrie budicí cívky a svorníku byl vyroben funkční model a měřením na průtokoměrné lince bylo uskutečněno porovnání s původním průtokoměrem. Při porovnání směrnic z kalibračních přímků byl funkční model o 65 % citlivější než původní průtokoměr. Tím bylo potvrzeno, že výsledné magnetické pole bylo u funkčního průtokoměru homogennější a silnější než u původního průtokoměru. Pomocí tohoto měření byl splněn hlavní cíl diplomové práce. Vedlejším produktem této práce bylo porovnání programů Ansys a Comsol Multiphysics.

Oproti zadání byl navíc řešen vliv rychlostního profilu proudění na výsledné napětí mezi elektrodami. Porovnávala se napětí, která byla vypočtena pomocí rychlostního profilu a bez profilu. Jak při porovnání laminárního, tak i turbulentního proudění, bylo prokázáno, že na výslednou přesnost vypočteného napětí má rychlostní profil proudění značný vliv.

Z provedených simulací a reálného měření lze odvodit, že mezi faktory mající zásadní vliv na magnetické pole patří: velikost úhlu výseče vzduchové mezery, podélná šířka budicích

cívek, poměr stran vinutí cívky, podélná šířka svorníků a vzdálenost mezi svorníkem a vnější trubicou průtokoměru.

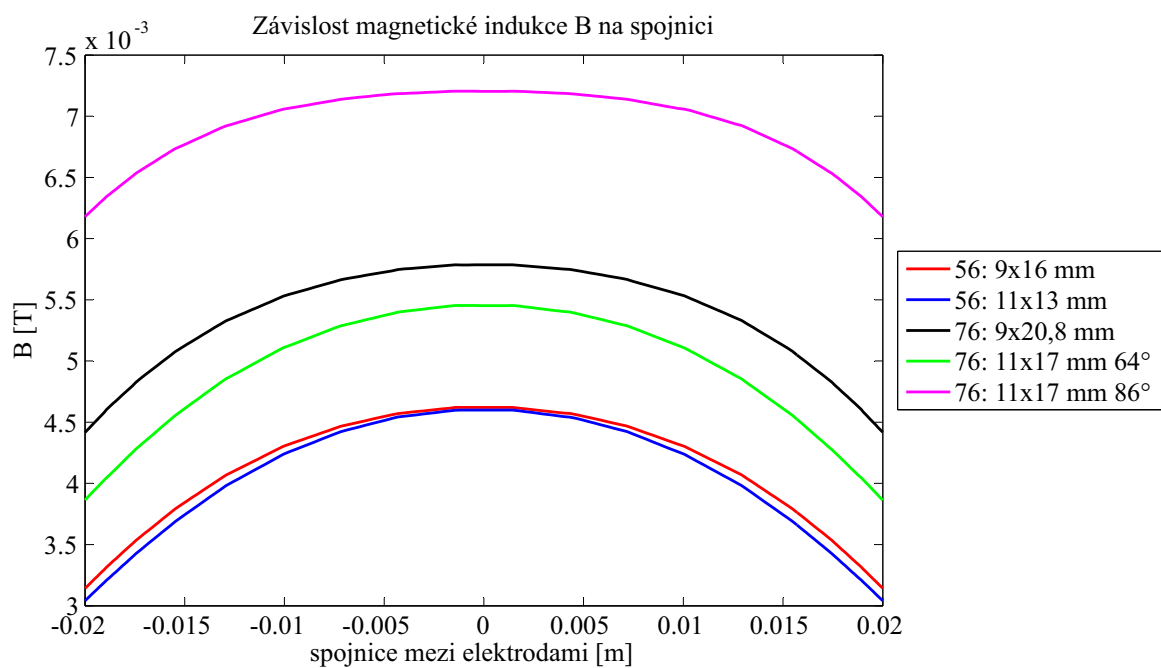
Do dalšího vývoje elektromagnetického průtokoměru lze zahrnout implementaci pólových nástavců i další vlivy např. tvar elektrod, vliv drsnosti vnitřních stěn, chybovost měření v důsledku výskytu plynu v kapalině.

Literatura

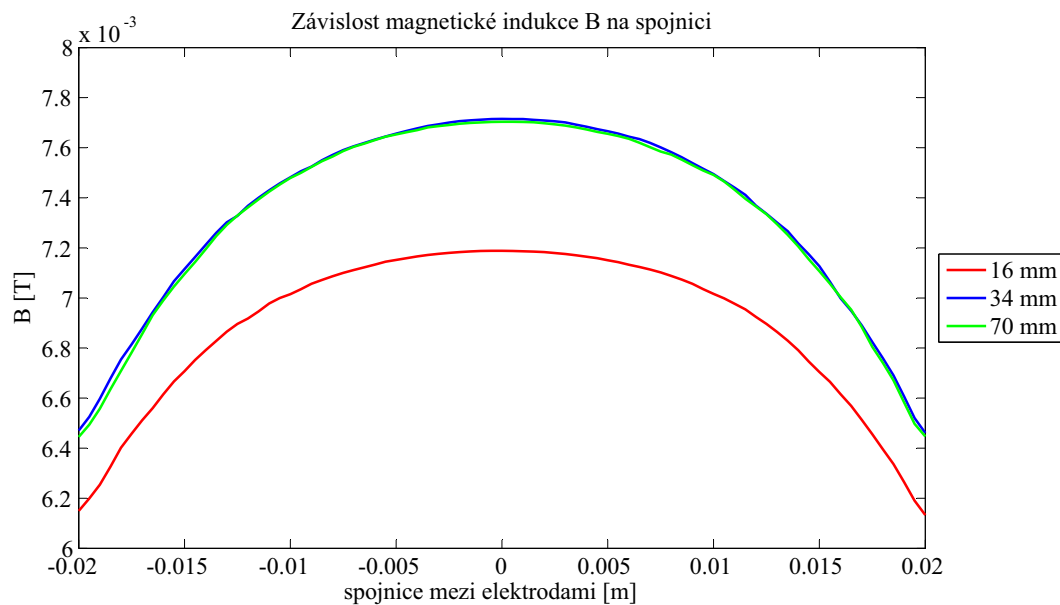
- [1] *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public s.r.o., 2012, roč. 18, č. 10. ISSN: 132 466.
- [2] Ďaďo, S.; Bejček, L.; Platil, A.: *Měření průtoků a výšky hladiny*. BEN - technická literatura, 2005, ISBN 80-7300-156-X.
- [3] Fleischner, P.: *Hydromechanika*. Vysoké učení technické v Brně, 1990, ISBN 80-214-0226-1.
- [4] Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J.: *Fyzika: Elektřina a magnetismus*. VUTIUM, PROMETHEUS, 2006, ISBN 80-214-1868-0 (VUTIUM), 81-7196-213-9 (PROMETHEUS).
- [5] Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J.: *Fyzika: Mechanika – Termodynamika*. VUTIUM, PROMETHEUS, 2006, ISBN 80-214-1868-0 (VUTIUM), 81-7196-213-9 (PROMETHEUS).
- [6] Kolář, V.; Němec, I.; Kanický, V.: *FEM principy a praxe metody konečných prvků*. Computer Press, 1997, ISBN 80-7226-021-9.
- [7] Kopal, A.; Erhart, J.; Čmelík, M.; aj.: *Fyzika II*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008, ISBN 978-80-7372-311-8.
- [8] Kopal, A.; Machonský, L.; Šimek, L.; aj.: *Fyzika I*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005, ISBN 80-7083-903-1.
- [9] Limesa meters s.r.o.: *Katalogové listy průtokoměru DN40*. Lomnice nad Popelkou, 2012.
- [10] Macháč, J.; Novotný, K.; Škvor, Z.; aj.: *Numerické metody v elektromagnetickém poli*. Praha: ČVUT, 2007, ISBN 978-80-01-03753-9.
- [11] Nožička, J.: *Mechanika tekutin*. Praha: ČVUT, 2006, ISBN 80-01-02865-8.
- [12] Novotný, K.: *Teorie elektromagnetického pole I*. Praha: ČVUT, 2005, ISBN 80-01-03226-4.

- [13] Rosický, J.: *Optimalizace magnetického pole čidla indukčního průtokoměru*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, 2011, 57 s., vedoucí práce: Lubomír Slavík.
- [14] Urbášek, J.: *Termomechanika a mechanika tekutin*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005, ISBN 80-7083-943-0.

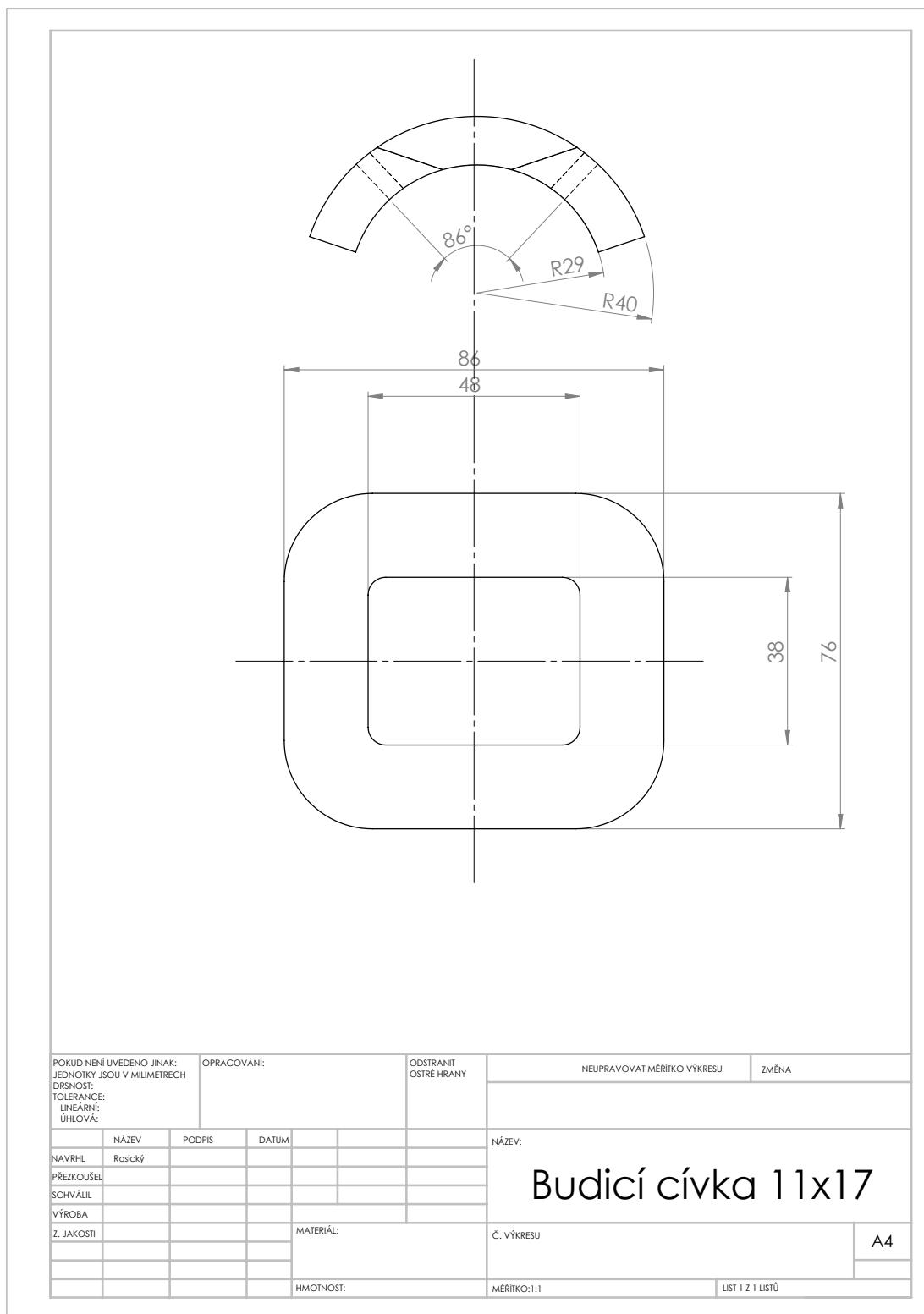
Příloha A – Graf závislosti magnetické indukce B na spojnici u budicích cívek z programu Comsol Multiphysics



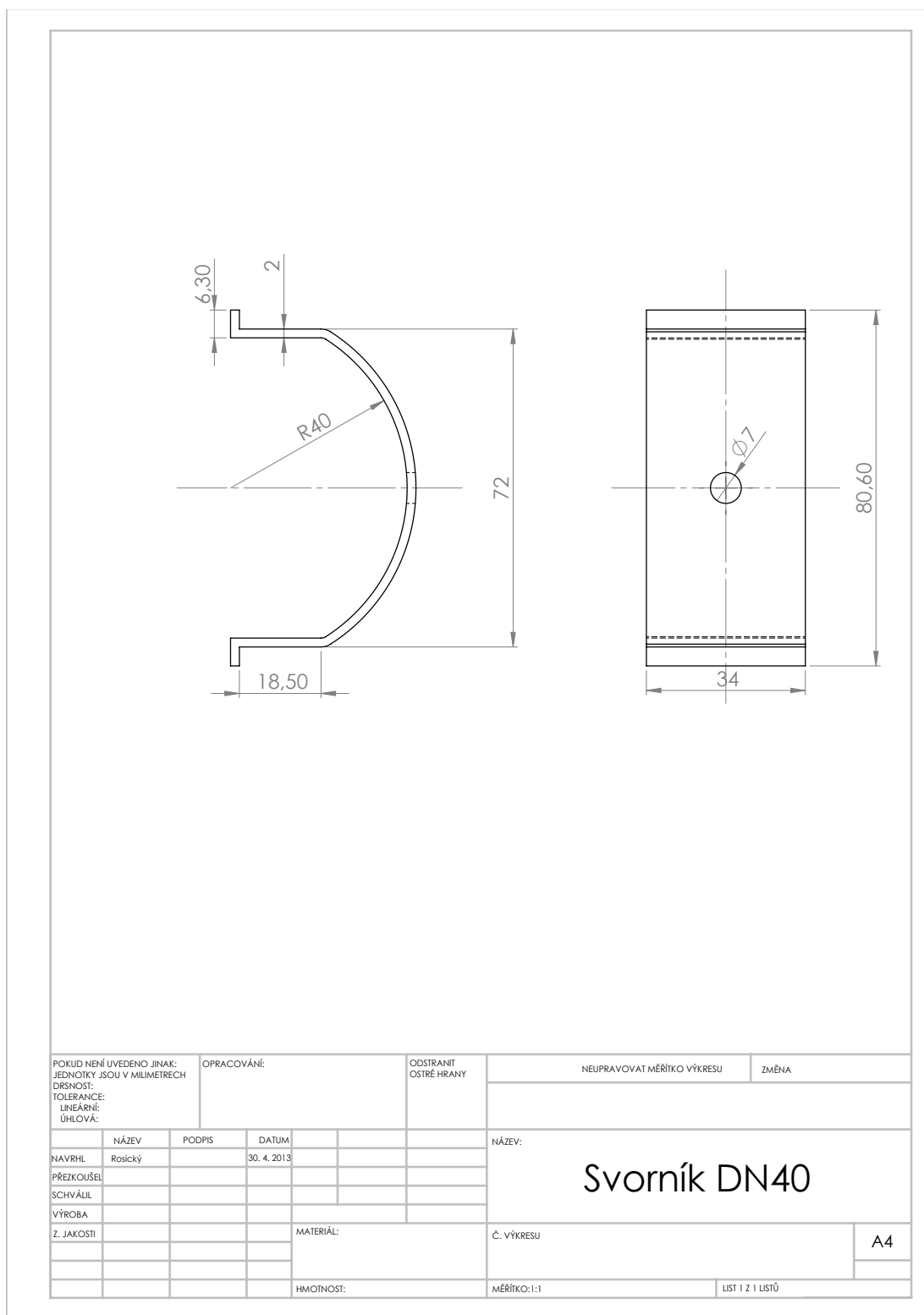
Příloha B – Graf závislosti magnetické indukce B na spojnici u svorníků z programu Ansys



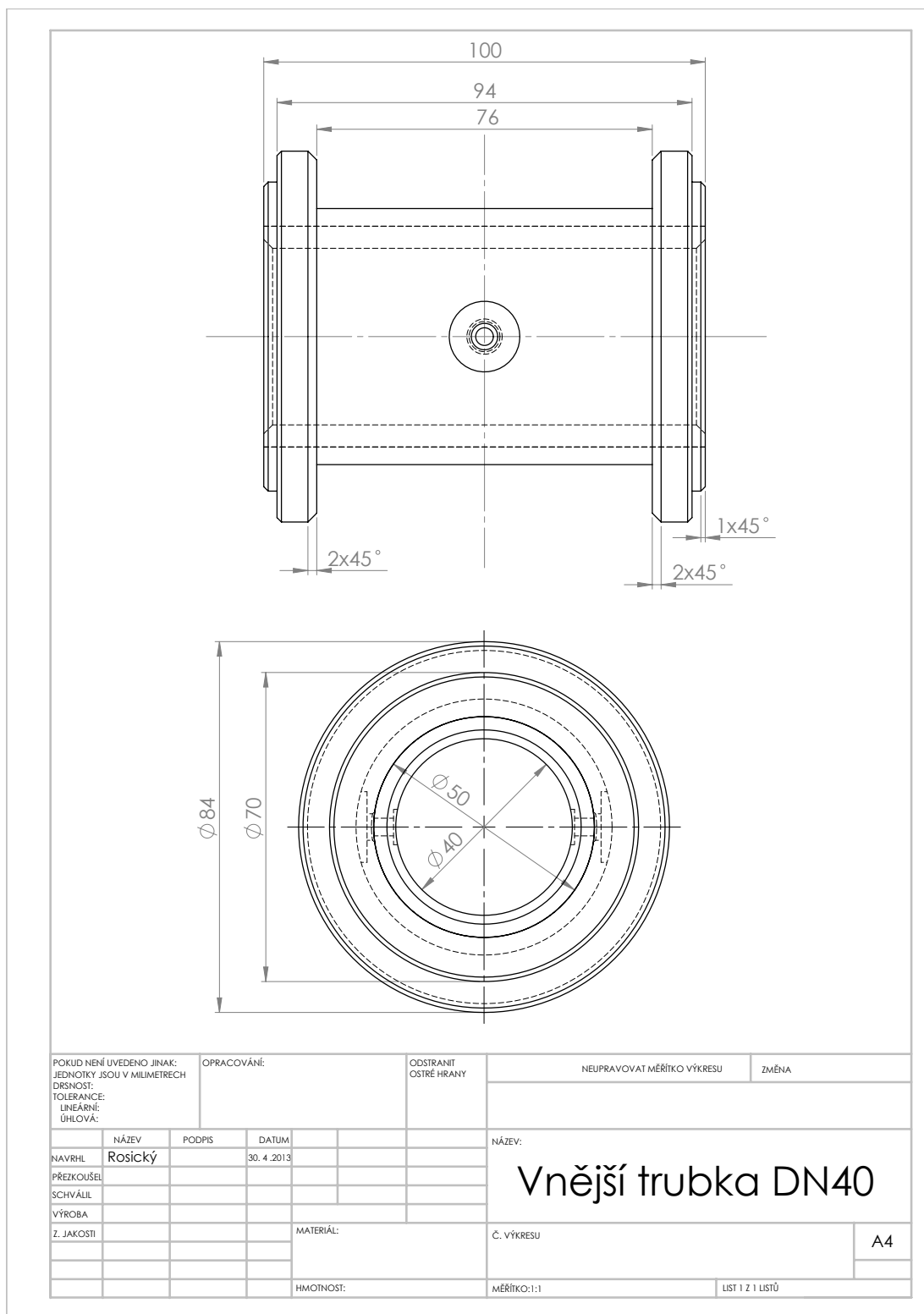
Příloha C – Výkresová dokumentace budicí cívky DN40



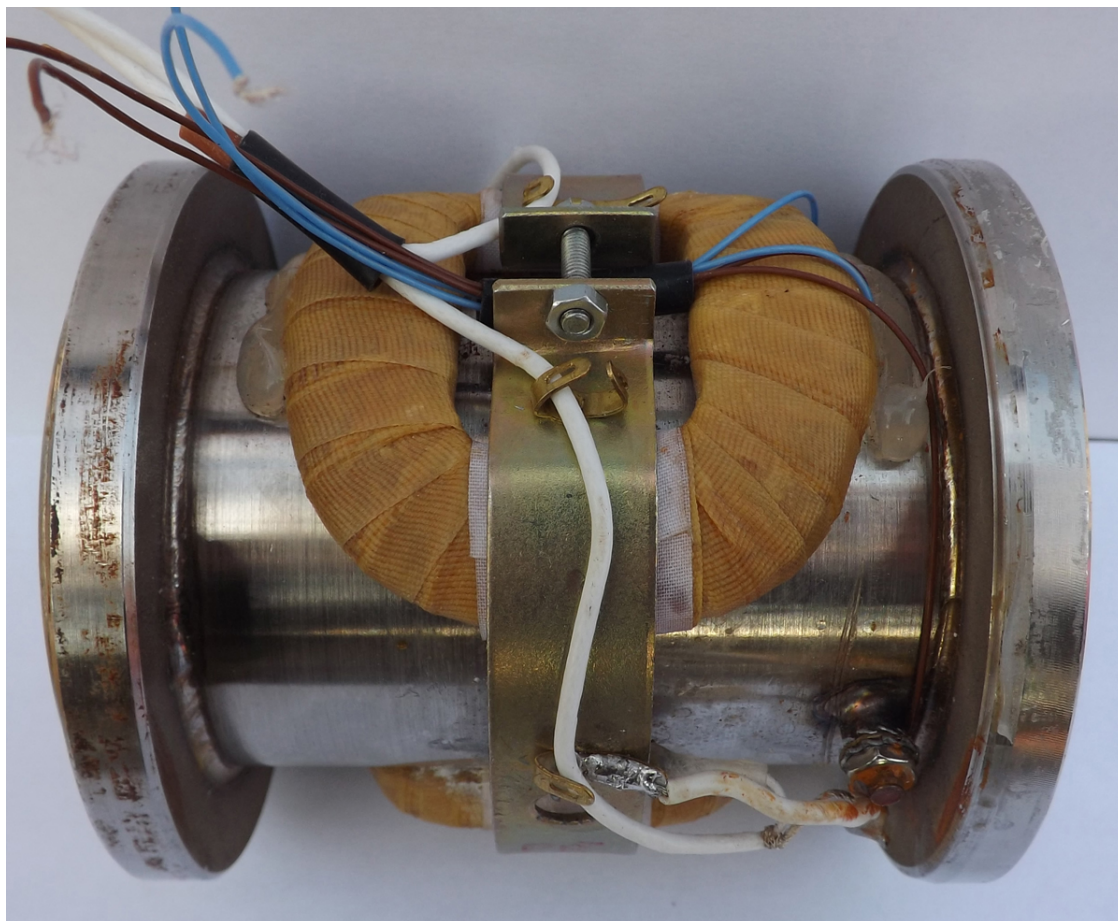
Příloha C – Výkresová dokumentace svorníku DN40



Příloha C – Výkresová dokumentace vnější trubky DN40



Příloha D – Fotografie původního elektromagnetického průtokoměru



Příloha E – Rozložení magnetické indukce B v rovině elektrod u původního průtokoměru a u funkčního modelu průtokoměru s ocelovými svorníky

